TÉCNICA

Revista de Engenharia

Publicação trimestral de investigação científica e desenvolvimento

nº1/96 Janeiro 96

ISSN 0040-1714 pvp 600.00

mateace
ELECTRICIDADE, S. A.

Manutenção de Seccionador em 15kV em Tensão

ENGENHARIA

PROJECTOS

MONTAGENS

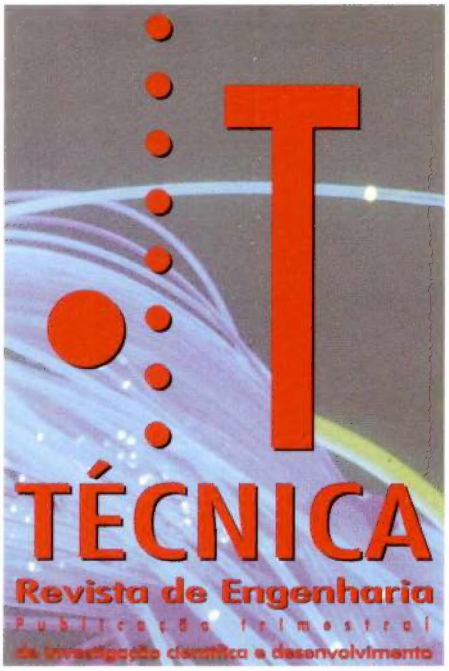
MANUTENÇÃO

CONSULTADORIA

- **Trabalhos em tensão (TET BT/MT)**
- **Redes Aéreas e Subt. de BT. MT e AT**
- **Postos de transformação**
- **Coogeração de energia**
- **Instalações Industriais**
- **Loteamentos**
- **Utilização Racional de Energia Eléctrica (UREE)**

- **Equipes de Contaagem e Telemedida**
- **Topografia**
- **Termografia**
- **Iluminação**
- **Fabrico e comercialização de Sinalizadores para Linhas Aéreas**

SEDE: Rua Padre Manuel Bernardes, 85 Padrão da Légua 4465 - São Mamede de Infesta
(Armazém) Telefs.: (02) 953 63 35/6 - 953 64 09 Fax (02) 951 67 41



Aqui poderia estar um anúncio seu.

Para mais informações contacte-nos pelos telefs.: (01) 355 92 94/5 - 353 73 21 – Fax/Telef.: (01) 353 73 16
ou escreva-nos para: DOSSIER, comunicação e imagem, Lda., R. Eça de Queirós, 18-2.° – 1000 LISBOA

índice

Editorial 2

ARTIGO CONVIDADO

Geometrodinâmica de Pulsares: As Magnetosferas: A.A. da Costa 3

COMUNICAÇÕES CIÊNTIFICAS:

GMRES: Um Algoritmo Iterativo para Sistemas Lineares não Simétricos: José A. Sousa Rodrigues 17

Calibração de Opacimetros de Unidades de Fabrico de Pasta de Celulose: João F.P. Gomes 23

Probabilistic wave Modelling in Coastal Waters: C. Guedes Soares 31

Ion Selective Microelectrodes in Experimental Physiology: J.A.G.C. Sequeira and C.A.C. Sequeira 43

A Morfologia da Cidade de Lisboa: da Época Medieval à cidade actual: Mário Krüger, Teresa Valsassina Heitor e Ana Tostões 49

Índices Anteriores: 71

FICHA TÉCNICA:

TÉCNICA, Revista de Engenharia
Publicação trimestral - p.v.p. 600$00
distribuição gratuita aos sócios da AEIST e aos docentes do IST
ISSN 0040-1714
Depósito legal 85 962/95
Registo de Imprensa 101407

Propriedade
Associação dos Estudantes do Instituto Superior Técnico
Av. Rovisco Pais, P – 1000 Lisboa, Portugal
Contrib. N.º 501 055 606

Administração, Serviços Comerciais e Assinaturas
Av. Rovisco Pais, P - 1000 Lisboa, Portugal
Telef: 351 -1- 848 10 18/841 74 10
Fax: 351 -1- 847 40 14/849 92 47
Correio Electrónico – aeistdoc © eta.ist.utl.pl

Direcção
Director Científico: Manuel Abreu Faro
Director Executivo: Nuno Catarino
Vogais: Diogo Gomes, João Paulo Santos e João Santos
Secretariado: Paula Carvalho

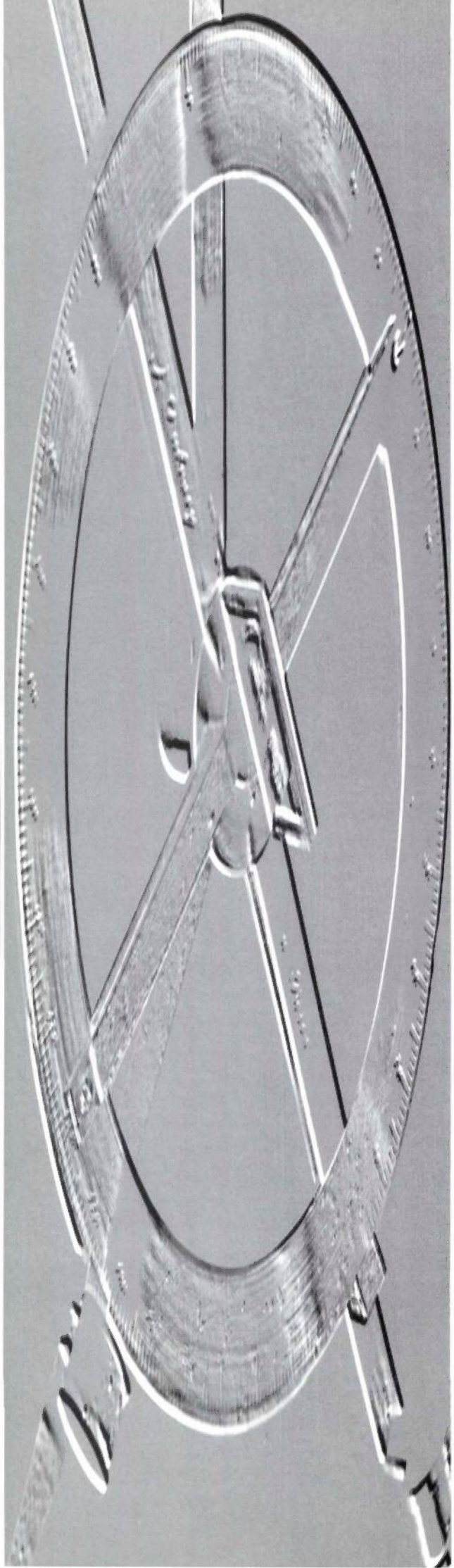
Concepção Gráfica
Traça Design
Praça da Alegria, 6 - 2.º Esq. – 1200 Lisboa
Telef: (01) 343 13 21
Fax: (01) 343 13 24

Publicidade
Dossier Comunicação e Imagens, Lda.
R. Eça de Queirós, 18 – 2.º Lisboa
Telef: (01) 355 92 94/5 – 353 73 21
Fax / Telef: (01) 353 73 16

Execução Gráfica
Gráfica Maiadouro, S.A.
VERMOIM – 4470 Maia
Telef. (02) 948 02 45/948 88 05
Fax: (02) 948 77 07
Delegação em Lisboa
Telef. (01) 796 92 10/795 53 00
Fax: (01) 796 92 79
Tiragem: 5000 ex.

TIB / Jean Pierre Horlin

Apoio
Conselho Directivo do Instituto Superior Técnico



EDITORIAL

Pelos inícios do Novo Ano,
surgiu o primeiro número da Técnica de 1996,
sinal de vida,
de vida sincronizada com o tempo.
Em 1996 completa o Instituto Superior Técnico 85 anos.
Sob a orientação do seu Presidente,
uma comissão diversificada
trabalha
no sentido de uma justa e condigna
comemoração dessas efemérides.
Gentilmente,
a Técnica foi convidada
a comparticipar.
Por ocasião dos 75 Anos,
num número especialmente significativo,
debruçou-se a Técnica
sobre os antecedentes, origens,
no que de importante e nesse período decorreu
no Instituto.
Pela ocasião do 80 anos do IST, prospectou-se
o futuro
das Ciências e Tecnologias
de que esta Escola se ocupa e ocupará.
E, mais uma vez,
a Técnica foi chamada a comparticipar.
Hoje,
por ocasião dos 85 Anos,
sente-se que o determinante
e característico,
é o que, organizada
e sistematicamente, se investiga
e quem nisso se investiga
e quem nisso se envolve.
Uma notícia sucinta e rigorosa
é o que se pode e quanto bastará,
para construir
não exactamente uma fotografia,
mas uma mancha,
suficientemente indiciadora,
da Investigação e Desenvolvimento
no Instituto Superior Técnico
por ocasião dos seus 85 Anos.

GEOMETRODINÂMICA DE PULSARES: AS MAGNETOSFERAS

A.A. DA COSTA
Centro de Electrodinâmica

SUMARIO

Pulsares são estrelas relativistas, cujos mecanismos de radiação se suportam nos modelos das respectivas magnetosferas. Embora a estrela seja compacta e a magnetosfera exija uma descrição tendo em conta todos os aspectos geometrodinâmicos, é possível isolar os efeitos puramente electromagnéticos, no contexto do espaço tetradimensional de Minkowski. A aproximação de partículas singulares do plasma magnetosférico é seguida, e efeitos radiativos têm de ser considerados na equação do movimento. Então uma descrição quasi-clássica é necessária, com trajectórias determinísticas substituídas por trajectórias estocásticas, pois correcções quânticas devidas aos efeitos radiativos têm de ser consideradas. Porém ao considerar os efeitos de Relatividade Geral o movimento do plasma será diferente. Neste artigo serão discutidos os processos físicos associados.

ABSTRACT

Pulsars are relativistic stars, whose radiation mechanisms are related to the models of their magnetospheres. Although the star is compact and its magnetosphere requires a description taking into account all geometrodynimical aspects, it is possible to isolate the pure electromagnetic effects, in the context of Minkowski 4-space. The single particle approach is followed, and radiative effects must be taken into account in the equation of motion. Then a quasi-classical description is required with deterministic trajectories substituted by stochastic ones, as radiative quantum corrections have to be considered. Nevertheless when

INTRODUÇÃO

A descoberta em 1967 por Jocelyn Bell (Hewish *et al,* 1968) do objecto PSR1919+21 criou um novo tipo de objectos cósmicos, os Pulsares, que se manifestam pela emissão de radiação electromagnética não térmica, modulada em impulsos periódicos. Formam dois grupos: o Grupo I, com períodos $0.033s < P < 3.0s$ (o PSR1919+21 tem $P \sim 1.33s$); o Grupo II apresenta períodos ainda mais curtos, $1.55ms < P < 10ms$ (Camilo, 1994). Existem ainda em sistemas binários, tanto do tipo I como do tipo II e radiam fundamentalmente na banda de radio frequência. Porém os pulsares do Caranguejo (CP), P=0.033s, ou de Vela, P=0.088s entre outros foram detectados noutras bandas electromagnéticas, e.g. óptica e raios-γ.

Estes impulsos individuais são morfologicamente muito diferentes uns dos outros duma forma aleatoria, mas com uma grande regularidade estatística, pois a média de cerca de 500 impulsos em sucessão no tempo, apresenta sempre o mesmo **impulso integrado** qualquer que seja a amostra (Fig. 1). Os impulsos individuais apresentam ainda elevado grau de polarização que

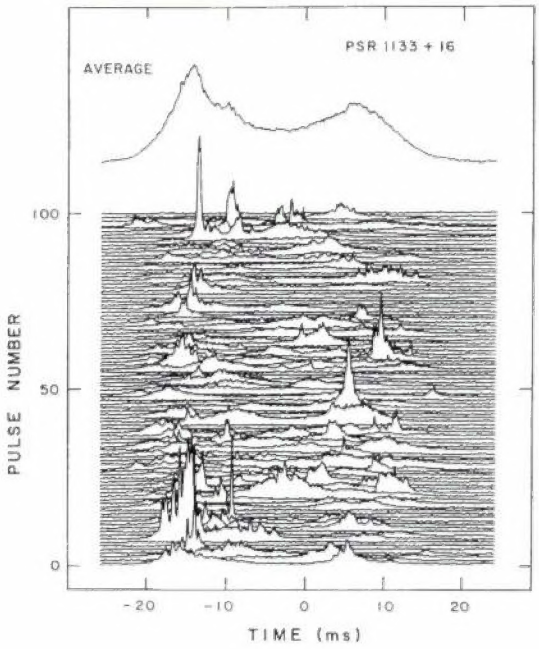


Fig. 1 ***Registo de 100 impulsos de PSR1133+66 a 600MHz*** – Impulsos consecutivos são mostrados verticalmente para mostrar variações de forma e tempos de chegada. Uma média de 500 impulsos, o impulso Integrado, é mostrado no topo, e é fixo (segundo Cordes, 1979; por cortesia do autor).

diminui com a frequência, embora seja uma polarização modulada, isto é, varia ao longo do impulso, e de impulso para impulso, verificando-se que a polarização do impulso integrado é inferior à dos impulsos individuais. Nalguns pulsares com uma resolução temporal da ordem dos microssegundos, os impulsos desdobram-se em microimpulsos (Fig. 2).

General Relativistic effects are considered, the motion of plasma will be different. In this paper the associated physical processes are discussed.

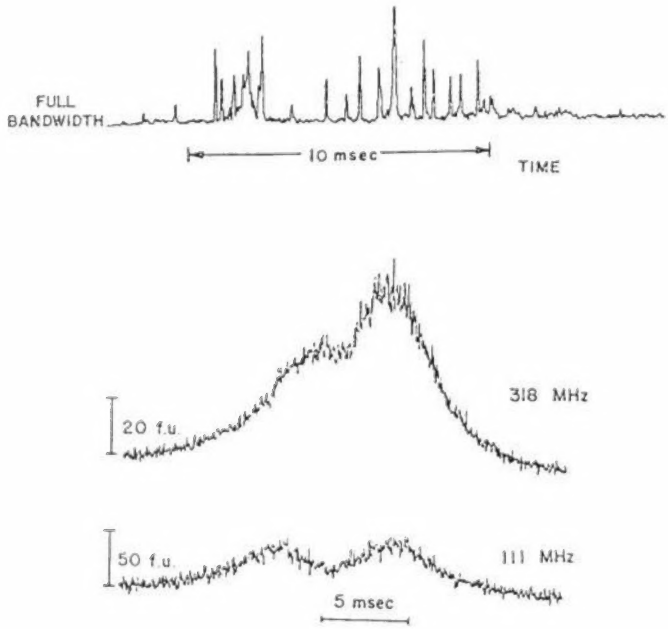


Fig. 2 ***Microestrutura e Impulsos integrados*** – No topo mostra-se um impulso do PSR0950+08 observado a 111.5 MHz. O tempo de resolução é de 56 ms. Porém o Impulso integrado formado a partir de 1500 impulsos individuais, é semelhante a estes, quando estes são observados com tempos de resolução normais da ordem dos milissegundos. Neste caso é interessante observar o "ruído" sobreposto ao Impulso Integrado consequência da microestrutura (segundo Rickett *et al*, 1975; por cortesia dos autores)

A descoberta do CP, mostrou que os pulsares eram estrelas de neutrões em rotação rápida, de acordo com a Hipótese de Gold (1968). Só estes corpos compactos com uma massa inferior a $3M_{\odot}$ (em unidades geométricas $1M_{\odot} \sim 3$ km) e um raio da ordem dos 10 km, permitiam explicar não só os curtos períodos observados, mas também a sua enorme variedade e precisão. São os relógios mais precisos.

Admite-se que as estrelas de neutrões do Grupo I são o que resta das supernovas pela implosão do núcleo das estrelas que explodem. A implosão conserva o momento angular o que implica um período inicial $P_{in} < P$, devido ao processo posterior de desaceleração da estrela; e conserva o fluxo magnético resultando uma indução magnética final à superfície $B_s \sim 10^8$T, valor assumido e associado a um momento dipolar magnético **d**. Haveria assim um campo electromagnético (CEM) girante e dipolar corrodando com a estrela com velocidade angular Ω, e, por isso mesmo, de baixa frequência, o modelo de Deutsch generalizado (Deutsch, 1955), desde que o espaço à volta da estrela fosse vácuo electromagnético, e o espaço-tempo associado, o espaço quadridimensional de Minkowski (espaço-M). A potência radiada, com $B_s \sim 10^8$T, é igual à potência cinética de desaceleração $I\Omega\dot{\Omega}$, onde I é o momento de inércia e $\dot{\Omega}$ tem um valor proveniente da observação. Porém o mecanismo de manutenção deste CEM é desconhecido. Admite-se que a indução magnética enfraquece ao mesmo tempo que P cresce, e para P > 3s tem um valor abaixo dum valor crítico para o qual os pulsares deixam de radiar. As respectivas estrelas de neutrões passa-

riam por um largo período mortas e ressuscitariam nos pulsares do Grupo II ao receberem uma injecção de matéria e respectivo momento angular, e voltavam a radiar com os períodos muito curtos observados e $B_s \sim 10^4$T (para mais detalhes ver Dewey, 1989).

O valor de B_s define o exterior da estrela como uma região extensa, a magnetosfera. Esta região não é vácuo electromagnético, mas contem um plasma de electrões e positrões cuja fonte é a estrela, embebido num CEM global girante de baixa frequência Ω, sobreposição do CEM dipolar com um CEM não dipolar de que o CEM dipolar é raiz, gerado pelo movimento do plasma magnetosférico no CEM global. A determinação deste é assim um problema funcional complexo, pois depende da relação mútua entre a estrutura do CEM que acelera o plasma e a distribuição deste, e da distribuição do CEM à superfície.

Este plasma existe devido à condição fronteira electromagnética à superfície da estrela. Simplificando, no interior manifesta-se a condição de condutividade perfeita, que em espaço-M é $\mathbf{E}+(\Omega\times\mathbf{r})\times\mathbf{B}=\mathbf{0}$; mas no exterior as partículas podem mover-se ao longo das linhas de força do campo magnético e assim $\mathbf{E}+(\Omega\times\mathbf{r})\times\mathbf{B}=-\nabla\phi$ (Goldreich & Julian, 1969; Mestel, 1971). Existirá uma densidade de carga à superfície da estrela, o campo eléctrico terá aí descontinuidades devido à rotação, e como $\mathbf{E}.\mathbf{B}\neq 0$ à superfície, cargas são retirados da estrela, processo físico que não está claramente estabelecido (Ruderman & Sutherland, 1975), e lançados na magnetosfera. Forma-se assim um plasma de electrões positrões separáveis naturalmente subluminosos, com uma densidade de corrente de condução e carga de espaço associadas, rodando com a velocidade angular do pulsar, e que quando situadas para além do cilindro de luz do pulsar (CLP), cilindro virtual que corrodando com a estrela terá a velocidade da luz, e raio $R_L=c/\Omega$, apresentam velocidades lineares azimutais superluminosas, sendo isto possível porque não possuem inércia. Estas distribuições geram a componente não-dipolar do CEM, devido não só ao valor de $\mathbf{E}.\mathbf{B}/B\neq 0$ em toda a parte, que uma tal componente procura diminuir (Princípio de Le Chatelier, Mestel *et al*, 1976) alterando também **B**, mas também devido ao comportamento dinâmico diverso das diferentes partículas do plasma, relacionado com a geometria do CEM global, e valor da relação E/cB. Estas afirmações são verdadeiras mesmo para o caso em que $\Omega\|\mathbf{d}$, e assim mesmo no caso axissimétrico a estrela de neutrões é activa. No caso geral $\Omega.\mathbf{d}\neq 0$, o CEM não dipolar não tem simetria azimutal e a longa distância do pulsar constitui a radiação de radio frequência.

Desta forma pulsares são estrelas relativistas que contém fenomenologia que se desenvolve em condições extremas, pois são corpos hipercompactos, com $R_s/2M\leq 3$ em unidades geométricas (2M=1M$_\odot$), com CEM hiperintensos. Assim o interior da estrela e a magnetosfera constituiem dois espaços geometrodinâmicos (espaços-G), cujas métricas têm o mesmo valor à superfície, em particular no caso de pulsares do Grupo II com um $R_L\sim 4R_s$. A estrela apresenta fenomenologia diversa no seu interior, à sua superfície, e no seu exterior, não sendo suficientes descrições clássicas. As descrições quânticas em espaços-G são inevitáveis.

O interior apresenta densidades internas muito elevadas no seu centro, superiores à densidade dos núcleos atómicos (supra-nucleares), limitada superiormente pela impossibilidade da velocidade do som não poder ser superior à velocidade da luz; mais próximo da superfície as densidades decrescem, tornando possível matéria formada por neutrões e possuindo um electrão/protão por cada 8 (oito) neutrões. O interior da estrela apresenta assim superfluidez e supercondutividade. A superfície será uma camada de transição entre o interior e o exterior da estrela, definindo uma condição

fronteira difusa, com uma crosta formada por Fe^{56} e encontra-se no estado sólido apesar da sua temperatura ser da ordem dos 10^6K. Como $B_s \sim 0.1\ B_{cr}$, onde $B_{cr} \sim 4\times10^{13}T$ é o limite superior da aproximação clássica então a superfície é constituida por uma rede atómica polimerizada de átomos que em campos magnéticos intensos, apresentam uma nuvem electrónica cilíndrica, e que devido a esta estrutura, encaixam uns nos outros, permitindo a existência de camadas de electrões livres que podem ser facilmente extraídos (Irvine, 1978). O movimento próximo da superfície da estrela tem um limite superior de energia, devido ao efeito superluminoso de Ginzburg (Ginzburg, 1989) generalizado a espaços-G. Ele foi estabelecido para espaços-M relacionado com polarização do vácuo, que começa a ser importante quando $\gamma B > 10^{11}T$, transformando o vácuo num meio anisotrópico, e que impede valores elevados de γ (o factor de Lorentz), necessários para explicar a radiação-γ.

O plasma magnetosférico, constituído por electrões e positrões, devido ao CEM hiperintenso apresentará regiões ultrarelativistas, cuja distribuição tem em conta as condições fronteiras electromagnéticas e geometrodinâmicas. Neste trabalho far-se-á o estudo das magnetosferas na vizinhança do CLP, para pulsares do Grupo I, em espaço-M, pois o CLP tem um raio directamente proporcional a P, com 1500 km para o CP. Assim usar-se-á electrodinâmica clássica com correcções quânticas, admitindo condições fronteiras à superfície compatíveis. Concluir-se-á que a radiação no domínios das radio frequências e dos raios-γ poderá existir na vizinhança ou no exterior do CLP. Será ainda feita uma generalização a espaços-G, identificando também os problemas associados a uma tal descrição.

2. A DESCRIÇÃO MINKOWSKIANA DAS MAGNETOSFERAS

2.1. Movimento de Partículas numa geometria bi-dimensional

Num pulsar $\mathbf{d}.\Omega \neq 0$, combinação não-linear de: $\mathbf{d}\|\Omega$, o **modelo axissimétrico**; e $\mathbf{d}\perp\Omega$, o **modelo perpendicular**. Neste artigo situar-nos-emos no modelo perpendicular, o modelo mais simples que permite explicar a radiação observada, por não possuir simetria azimutal. O modelo axissimétrico pode ser consultado em Fitzpatrick & Mestel (1988,a,b).

O CEM pode ser assumido como dipolar, desde que consideremos um plasma de baixa densidade. Então o plasma é um conjunto de partículas isoladas, consequência da energia electromagnética do CEM ser muito superior à energia de interacção das partículas, o que reforça a utilização da **Aproximação de Partículas Singulares** (APS). Porém fora do plano equatorial o CEM tridimensional dipolar tem $\mathbf{E}.\mathbf{B} \neq 0$. Simplificando (da Costa & Kahn, 1982; da Costa, 1983), usa-se uma configuração bidimensional. Esta estrutura cilíndrica parecer-se-á com a configuração tridimensional no plano equatorial, e os seus resultados farão sentido se nos mantivermos numa região pequena, com uma dimensão linear da ordem de $0.1\,R_L$.

Numa geometria 2-D o CEM "dipolar" é derivado do potencial vector

$$\mathbf{A} = A_0\sqrt{J_1^2(\beta)+Y_1^2(\beta)}\,\cos\left\{\varphi-\omega t+arctg\left[\frac{Y_1(\beta)}{J_1(\beta)}\right]+\Psi_1\right\}\mathbf{a}_z \qquad (1)$$

Nesta expressão J_1 e Y_1 são funções de Bessel, $\mathbf{a}_z\|\Omega$, $\beta=\rho/R_L$ e Ψ_1 é um parâmetro de fase. Com este potencial vector o CEM tem $\mathbf{E}\|\mathbf{A}$, $\mathbf{H}\perp\mathbf{A}$ e as linhas de campo magnético (LCM) são linhas de A constante $A_c = A_0 C_c$,

que define $\Psi \equiv \varphi - \omega t = \Psi(\beta)$. O valor de Ψ_1 é escolhido de maneira que $C_* = \sqrt{J_1^2(1) + Y_1^2(1)} = 0.8966$ para a LCM tangente ao CLP, e $\Psi' = 0$ para $\Psi = 0$ e $\beta = 1$, que corresponde à LCM $C_* = 0.6858$ (fig. 3).

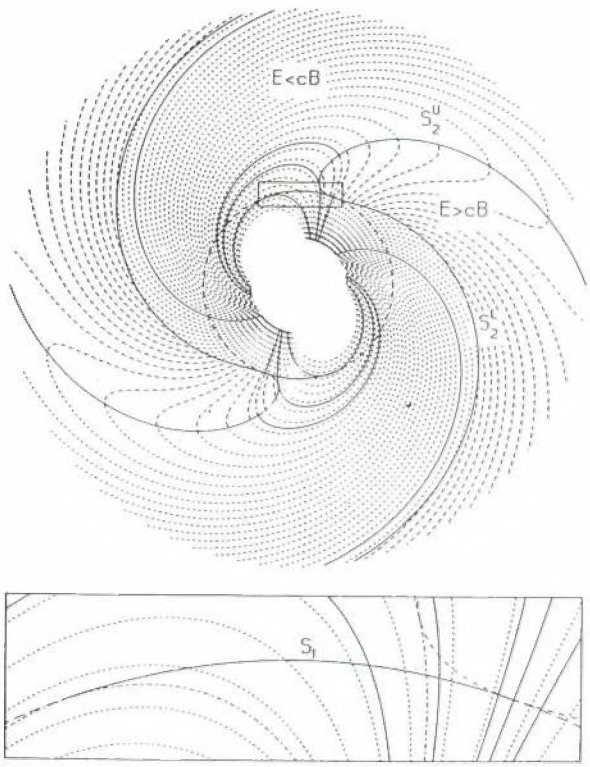


Fig. 3 ***As linhas de força do campo magnético do modelo bidimensional*** – Nesta imagem estão representadas as regiões E<cB, E>cB, as regiões de transição E=cB entre uma e outra e o segmento do CLP onde as linhas de força se orientam na direcção do movimento. Distingue-se ainda a região S_2^U, e a região S_2^L (ver texto). O rectângulo inferior mostra com mais detalhe a região do CLP onde as linhas de força se orientam na direcção do movimento. A cheio estão as LCM C_* = 0.66, 0.6858, 0.70, 0.75, 0.80. C_* =0.6858 é perpendicular ao CLP; C_* =0.8966 é tangente ao CLP (segundo da Costa & Kahn, 1982; e da Costa, 1983).

As partículas iniciam o seu movimento junto à superfície da estrela com $\dot{z} \sim 0$ e $\gamma_0 = 1$, próximo de uma LCM. A partícula move-se ao longo das LCM. Porém quando as partículas atingem a secção do CLP aonde $\Psi' > 0$, ou quando atingem as duas superfícies de transição das regiões $E < cB \rightarrow E > cB$, superfícies $S^U{}_2$ e $S^L{}_2$, a energia $\varepsilon \rightarrow \infty$, e a partícula tem de abandonar a LCM a muito curta distância das superfícies, da ordem dos $10^{-5}\, R_L$ para o CP. Este valor tão baixo é consequência do parâmetro

$$\eta \approx \frac{eA_0}{mc} \tag{2}$$

que mede a intensidade do campo electromagnético (Rees, 1971), razão entre a energia adquirida por uma partícula sujeita a uma diferença de potencial numa distância da ordem de R_L, e a energia de repouso da mesma. que é inversamente proporcional a P^2 e para o CP e electrões vale $\eta \approx 10^{10}$ junto ao CLP onde B ~ 100T. Um cálculo tem então de começar, que tem de ter em conta a reacção de radiação sobre o movimento das partículas.

2.2. A Aproximação Quase-Clássica

Os estudos sobre os efeitos da radiação das partículas sobre a sua própria trajectória remontam a Schott (1912), mas a sua formulação covariante no domínio clássico foi feita por Dirac (1938). A descrição clássica é válida desde que $\hbar\omega_{max} << \gamma mc^2$, com $\omega_{max} = \gamma^3 c/\rho$, onde r é o raio da trajectória, o valor de w para o qual o espectro da potência radiada P_{rad} expresso por $P_{rad}(\mathbf{p}, \mathbf{n}, w, t)$, é máximo. A equação de Lorentz-Dirac do movimento (EL-DM) duma partícula clássica é

$$u^i = \frac{e}{m} F^{ik} u_k + \chi \ddot{u}^i + \frac{\chi}{c^2}\left(\dot{u}^j \dot{u}_j\right) u^i \tag{3}$$

com c ~ 6.27 × 10^{-24}s para um electrão (positrão), o tempo que um sinal leva a percorrer uma distância igual a 2/3 do raio do electrão/positrão, e onde os três termos na EL-DM são respectivamente os termos de Lorentz, Schott e Dirac. O termo correspondente à coordenada tempo mostra a possibilidade de uma partícula radiar tanta P_{rad} como aquela que adquire através da força de Lorentz, P_{Lor}. Nesta situação a partícula tem $\gamma \sim 10^7$ e radia na banda dos raios-γ duros, da ordem dos 10GeV. A descrição do campo radiado têm de ser feita por fotões, a energia é radiada de forma discreta e aleatória, e daí que os seus efeitos são também discretos e aleatórios. Porém a EL-DM foi estabelecida para campos radiados com descrição ondulatória, sendo a energia radiada de forma contínua. Logo não pode ser usada.

Nestas circunstâncias tem de ser usado o regime q-clássico (quase-clássico), uma correcção quântica ao regime clássico (da Costa & Kahn, 1991). Nesta descrição tal como na correspondente descrição clássica sem efeitos radiativos, as partículas movem-se devido à acção da força de Lorentz. Porém há mudanças bruscas de momento e energia devido à radiação de fotões de raios-γ com frequências aleatórias, a intervalos de tempo aleatórios. As trajectórias passam de determinísticas a estocásticas. Trata-se de um processo de Poisson composto, com $\lambda(\mathbf{p}, t)$ a probabilidade de radiar um fotão por unidade de tempo, e que é igual ao número médio de fotões radiados por unidade de tempo. Estes intervalos de tempo t obedecem à distribuição

$$f_1(\tau) = \lambda(\mathbf{p}, t+\tau) \exp\left[-\int_t^{t+\tau} dt_1 \lambda(\mathbf{p}, t)\right] \tag{4}$$

Estes fotões individuais têm uma distribuição de densidade de probabilidade não normalizada $P_r(\mathbf{p}, \mathbf{n}, \omega, t) = (\hbar\omega)^{-1} P_{rad}(\mathbf{p}, \mathbf{n}, \omega, t)$, com momento linear **p**, e radiando $\hbar\mathbf{k} = \hbar(\omega/c)\mathbf{n}$, no interior dum cone cujo eixo é paralelo a **p**, e a abertura γ^{-1}. **p** é assim o eixo polar dum sistema de coordenadas esféricas. Desta forma **k** define três variáveis aleatórias: ω, θ e φ.

A radiação de fotões individuais estabelece uma fronteira difusa entre os domínios clássico e q-clássico onde $\hbar\omega \sim mc^2$; esta expressão apresenta uma extraordinária semelhança com a fronteira entre regimes não-relativistas e relativistas em plasmas térmicos onde $kT \sim mc^2$. Ao valor acima de w chamaremos $\omega_{Q-CL} (\sim 10^{21}\,\mathrm{Hz})$ e daí que fotões com $\omega < \omega_{Q-CL}$ não afectam o movimento das partículas. As partículas radiam preferencialmente em w_{max}, e fotões com $\omega >> k\,\omega_{max} (k > 1)$, têm uma baixa probabilidade de ocorrerem. Portanto só quando $\omega_{Q-CL} < \omega_{max}$ há uma probabilidade da trajectória da partícula ser afectada pela radiação.

Este processo de Poisson composto é de facto também um Processo de Markov discreto e é um caso particular dum processo de pontos com mar-

cas (Snyder & Miller, 1991), desde que $\hbar\omega \geq mc^2$. Definamos o espaço de marcas μ como o espaço de ocorrências de (ω, θ, φ). Seja *T* o intervalo de tempo [t_0, ∞); e $T \times \mu$ o espaço onde todas as marcas ocorrem. Então *M (T, B)* é o número de pontos existente no espaço $T \times B$, onde $T \subseteq \#$, e nesta nova descrição q-clássica a equação do movimento é

$$d\mathbf{p}(t) = e\left\{\mathbf{E}\left[\mathbf{r}(t),t\right] + \mathbf{v}(t) \times \mathbf{B}\left[\mathbf{r}(t),t\right]\right\}dt - \int_B \hbar\mathbf{k}\left[\mathbf{r}(t),\mathbf{p}(t),t,\mathbf{U}\right]M(dt,d\mathbf{U}) \tag{5}$$

A diferencial $d\mathbf{p}(t) = \mathbf{p}(t+dt) - \mathbf{p}(t)$ é o incremento em **p**(*t*) que ocorre durante (*t, t+df*]. Colocando

$$\int_B M(dt,d\mathbf{U}) = \begin{cases} 0, \text{ nenhum fotão radiado no tempo } dt, \text{ ou, se radiado } \omega < \omega_{Q-Cl} \\ 1, \text{ o fotão radiado no tempo } dt \text{ tiver } \omega > \omega_{Q-CL} \end{cases} \tag{6}$$

Se nenhum fotão é radiado, ou se radiado, $\omega < \omega_{Q-CL}$, então $d\mathbf{p}(t) = e(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})dt$; mas se um fotão é radiado com frequência $\omega > \omega_{Q-Cl}$ então um ponto com uma marca significante **u** ocorre, e $d\mathbf{p}(t) = e(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})dt - \hbar\mathbf{k}\left[\mathbf{r}(t),\mathbf{p}(t),t,\mathbf{u}\right]$. Como só há descontinuidades nos pontos de radiação eficazes, a integração é feita de ponto a ponto de radiação eficaz, só com a Força de Lorentz, e no extremo do intervalo deduz-se o momento linear do fotão radiado.

Para a magnetosfera do CP, a fronteira entre domínios clássicos e q-clássicos é atingida quando $\gamma \sim 10^6$. A simulação na região q-clássica suporta-se num Método de Monte-Carlo para gerar as várias variáveis aleatórias em presença. No caso dos pulsares interessa cálcular as pseudo-trajectórias no referencial que roda com a estrela, mas com as grandezas de momento e energia no referencial do observador. Os resultados (Fig. 4) mostram que várias partículas, com a mesma pseudo trajectória clássica, seguirão pseudo trajectórias aleatórias todas diferentes, mas muito próximas umas das outras. Isto sucede para todas as partículas, e portanto é expectável um feixe de trajectórias atingindo $\gamma \sim 10^7$. Para esse valor $P_{rad}/P_{Lor} \sim 1$. A temperatura de um plasma equivalente com a distribuição de energias apresentada por este feixe de pseudo-trajectórias seria cerca de $T_{eq} \sim 10^{14} K$, o que mostra que o processo radiativo é largamente dominante, o que reforça a APS, pois as interacções entre partículas não são importantes. Quando as trajectórias estão bastante afastadas da região onde $E > cB(C_\gamma \geq 0.75)$, há uma influência do movimento giromagnético nas trajectórias, não dominante, visto que a rotação do CEM de baixa frequência domina o processo (Kirk, 1980). Neste caso particular há fenómenos de ressonância observados nalgumas trajectórias, que amplifica a perturbação giromagnética. Todos estes fenómenos se passam para distâncias muito curtas, da ordem dos $10^{-5} - 10^{-6} - 10^{-7} R_L$, a que correspondem distâncias da ordem dos 10 - 1 - 0.1m conforme as trajectórias e o valor de C_γ, pois quanto maior $C_\gamma \geq 0.75$, menor a escala do fenómeno.

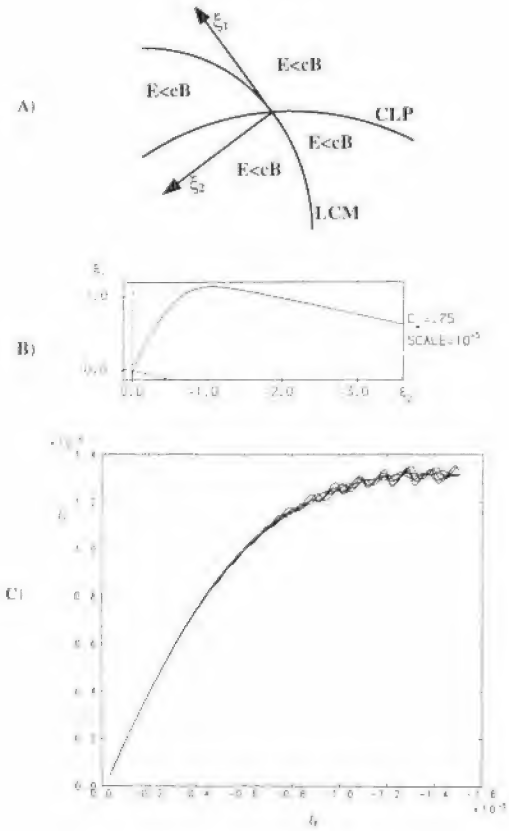


Fig. 4 ***Comparação entre pseudo-trajectórias para C_v=0.75 para o caso clássico e quase-clássico*** – No topo (figura A) mostra-se a representação do espaço aonde são feitas os cálculos das pseudo trajectórias para uma CLP que exista só em regiões onde E<cB. No meio (figura B) mostra-se o cálculo duma pseudo-trajectória usando EL-DM. Na última figura faz-se o mesmo cálculo para 6 pseudo-trajectórias usando considerações semiclássicas. A diferença é notória. Repare-se que enquanto para EL-DM todas as 6 pseudo-trajectórias coincidem o mesmo não se passa para o caso q-clássico, embora exista colimação (segundo da Costa, 1995).

2.3. O Comportamento Estatístico

A descrição do comportamento do plasma enquanto entidade colectiva, suporta-se na determinação da função de distribuição cinética $f(\mathbf{r}_1,\mathbf{p},t)$, onde $\mathbf{r}_1$ contêm as coordenadas no referencial de rotação, e que deve ser considerada como descrevendo um comportamento médio do plasma radiativo da magnetosfera. Como um tal plasma tem uma $T_{eq} \sim 10^{14} K$, a APS será a base do cálculo de $f(\mathbf{r}_1,\mathbf{p},t)$ (Kahn & da Costa, 1984), se tal descrição for possível.

O cálculo de exige frequências aleatórias e discretização no espaço. Como as trajectórias são estocásticas, esta discretização terá de ser inferior à dimensão mínima do fenómeno estocástico na direcção do movimento, e muito menor que o espraiamento das trajectórias no plano normal à trajectória, e nessas células deverá existir um número de partículas suficientemente significativo para que o plasma ainda possa ser identificado como tal. A densidade necessária à radiação de raios-γ é da ordem de $10^{12}-10^{14}$ electrões m^{-3} (da Costa & Kahn, 1983). Por exemplo, para $C_v = 0.75$ tal implica a presença nas células de 10^6-10^8 partículas. Neste caso existe um processo estocástico médio regular, e assim é possível estabelecer variedades regu-

lares médias, formadas por trajectórias. Porém quando $C_{\cdot} > 0.75$, para cada ordem de grandeza que a dimensão linear da célula decresça, o número de partículas por célula diminui de três ordens de grandeza. O carácter colectivo do plasma enfraquece.

Atendendo ao carácter descontínuo da radiação de fotões, haverá uma componente aleatória que varia no tempo e que deverá ser amplificada com o movimento do plasma. Este efeito é tanto mais forte quanto mais fraca for a descrição colectiva do plasma. A APS implica trajectórias estocásticas e deste modo o cálculo de $f(\mathbf{r}_1, \mathbf{p}, t)$ terá um carácter recursivo contínuo, com bifurcações múltiplas em toda a parte recursiva do cálculo. É assim possível encarar o plasma magnetosférico como um meio aleatório com características fractais.

No modelo bi-dimensional os electrões e positrões têm comportamento semelhante, mas quando $\dot{z} \to c$ os electrões e positrões afastam-se do plano equatorial em direcções opostas. Forma-se uma distribuição de densidade de corrente que pode rodar com velocidade superluminosa se estiver além do CLP. Veremos posteriormente quais as consequências.

2.4. O Modelo Tridimensional

A teoria exposta é independente dos modelos, e aplicada depois ao caso bidimensional. Portanto no modelo 3-D com $\Omega.\mathbf{d} \neq 0$ todos os fenómenos assinalados deverão estar presentes, mas as distribuições de carga de espaço e de densidade de corrente de condução estarão presentes duma forma ainda mais intensa, devido à assimetria de comportamento dos electrões e positrões devido ao ângulo entre Ω e **d**, e à presença de $\mathbf{E}.\mathbf{B} \neq 0$. Num tal modelo, ainda por desenvolver, as condições fronteiras à superfície terão um papel altamente selectivo.

Sabe-se entretanto que as distribuições de densidades de corrente e de carga de espaço, sem inércia, ao estenderem-se para além do CLP, corrodam com a estrela movendo-se com velocidades superluminosa. Em magnetosferas de pulsares o movimento do ponto-fonte das distribuições de cargas e correntes é circular e temos um número ímpar de ondas associadas a cada ponto-campo, consequência da expressão

$$t = s + \frac{R(s)}{c} \tag{7}$$

onde R é a distancia do ponto-campo ao ponto-fonte, poder ter mais de uma solução para cada t (fig. 5). Se o raio da circunferência da trajectória do ponto-fonte for $\beta<1$ ou o ponto-campo for interior ao CLP, então existe sempre uma e uma só onda no ponto-campo. Mas se $\beta>1$ e o ponto-campo estiver fora do CLP, então (7) dá dois números impares de ondas consecutivos, sendo o par função do raio da circunferência do ponto-fonte, estando o ponto-campo a receber um ou outro dos valores conforme o instante de recepção. A partir do CLP, com b crescente, o primeiro par é (1,3), depois muda para (2n-1, 2n+1) até ∞ sendo n é a ordem do par tal que $\beta \in [\beta_{2n-1}, \beta_{2n+1})$, sendo os extremos do intervalo as raízes de ordem n e n+1 da equação

$$tg\sqrt{\beta^2 - 1} = \sqrt{\beta^2 - 1}. \tag{8}$$

O CEM gerado pela distribuição de carga de espaço e densidade de corrente é assim semelhante, mas diferente do efeito Cerenkov. A superfície singular associada a cada ponto fonte é a justaposição duma superfície de Cerenkov associado aos mínimos das curvas *t=t(s)*, com uma superfície cor-

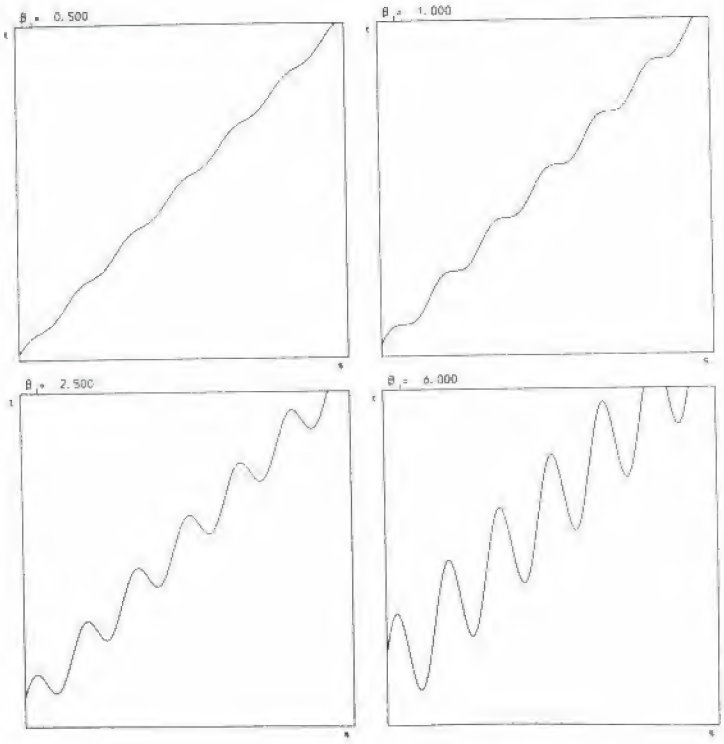


Fig. 5 ***Quatro diferentes representações de t = s+R(s)/c para quatro diferentes valores do raio da trajectória*** – O caso para a existência de mais de uma onda pode ser testemunhado para b_1= 2.5 e b_1=6. b_1=1 é um caso degenerado (segundo da Costa & Kahn, 1985)

respondente aos máximos, a superfície de Schott: é a superfície de Schott-Cerenkov (fig. 6; da Costa & Kahn, 1985). Também neste caso um contínuo de pontos-fonte fará desaparecer as singularidades assinaladas.

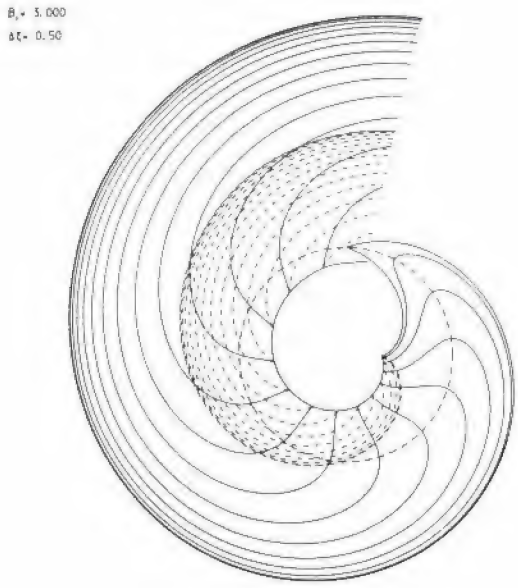


Fig. 6 ***Uma volta da superfície de Schott-Cerenkov*** – A figura mostra a intersecção da superfície com planos a altura constante. A superfície de Schott está escondida pela superfície de Cerenkov e está representada por linhas a traço interrompido. Como se pode ver a superfície de Schott desenvolve-se a partir duma cúspide no plano de simetria. O circulo a traço interrompido representa a trajectória do ponto-fonte cónico raio b=3.0 (segundo da Costa & Kahn, 1985).

O efeito de Schott-Cerenkov, um fenómeno superluminoso, para além de explicar as alterações não-dipolares ao CEM dipolar de baixa frequência do pulsar, deverá ainda explicar a radiação de radio-frequência (da Costa, 1976; Ardavan, 1994). As distribuições de densidade de carga e corrente associadas variam em distâncias $d \ll R_L$, e por isso a radiação de radio frequência constitui uma generalização da teoria da radiação sincrotrónica. A única diferença está no facto de que a direcção da radiação sincrotrónica máxima estar no plano osculador da trajectória, e no caso de radiação superluminosa, estar para fora do mesmo plano.

Como estas distribuições são também estocásticas, geram CEM de baixa frequência estocásticos, reforçando assim a estocacidade do processo. Por outro lado a radiação de radio frequência vem também afectada. Estes factos podem explicar as diferenças entre os impulsos individuais, e os efeitos de microestrutura (*ruído*) observado nalguns pulsares (Rickett *et al* 1975), e convergem com os trabalhos de Zhuravlev & Popov (1992), que identificaram componentes estocásticas no processo de radiação de radiofrequência.

3. A DESCRIÇÃO GEOMETRODINÂMICA DA ESTRELA

3.1. A Métrica da Estrela

Numa descrição geometrodinâmica, a determinação das métrica é o primeiro problema a ser resolvido. A métrica fora da estrela depende da densidade da matéria no seu interior, do seu momento angular e da energia do CEM de baixa frequência associado à estrela. A métrica interna influencia a equação de estado, e portanto, a densidade da matéria dentro da estrela. Ambas as métricas têm o mesmo valor à superfície da estrela, e desta forma influenciam-se mutuamente. Estamos perante um problema funcional do qual não existem soluções exactas.

Considerando só mecânica newtoniana, a energia cinética de rotação do pulsar do Caranguejo é $T_{rot} = 0.5 I \Omega^2 \sim 10^{42}\,\mathrm{J}$, e a energia electromagnética da estrela é $W_{em} \sim 10^{37}\,\mathrm{J}$. Como $W_{grav} = GM^2/R \sim 10^{46}\,\mathrm{J}$, então a estrela seria esfericamente simétrica se $T_{rot} = 0$, e axialmente simétrica segundo Ω sse $\Omega \| \mathbf{d}$. Repare-se que T_{rot} e W_{em} são correcções a W_{grav}. Esta é para $1M_\odot$ cerca de 15% da massa bariónica da estrela, cuja massa real é assim menor do que a sua massa bariónica, sendo o que falta toda a energia perdida no processo de formação do pulsar, devido à radiações luminosa, de neutrinos ou gravitacional (Kippenhahn & Weigert, 1990). A métrica fora da estrela não pode em geral ser a métrica de Kerr (Andrade, 1994), devido à existência da métrica interna, situação diversa dum buraco negro. Porém tanto T_{rot} como W_{em} são muito menores que a correcção devida ao campo gravítico. A métrica da estrela é por conseguinte uma métrica de Schwarschild perturbada (MSP), ou seja é uma série de potências de duas variáveis, uma $\varepsilon = (\Omega/\Omega_{crit})^2$, onde Ω_{crit} é o valor de Ω onde a força centrífuga iguala a força gravitacional no equador da estrela (Hartle, 1967); outra uma variável associada a uma energia electromagnética limite igual à energia gravitacional da estrela; o termo de ordem zero é a métrica de Schwarschild. Note-se que $\varepsilon < 1$ sempre; e para o cálculo do termo de ordem zero a massa a considerar é tão só a soma das componentes bariónica e gravitacional. Se T_{rot} é uma perturbação de segunda ordem, então W_{em} é de quarta ordem.

3.2. Problemas Associados com a Descrição Geometrodinâmica

Numa descrição em espaços-G, o comportamento electrodinâmico do plasma magnetosférico depende do CEM de baixa frequência, da métrica externa e das condições fronteiras à superfície; a influência do interior da estrela tem de ser considerada. Os efeitos de rotação diferem consideravelmente da teoria Newtoniana, e são (Miller, 1992):

1. O arrastamento dos referenciais de inércia;
2. Mudança nos efeitos centrífugos;
3. Mudança da relação entre o momento angular e a velocidade angular.

O tema 2, menos conhecido, tem sido estudado no contexto de uma métrica de Schwarschild com uma partícula rodando numa órbita circular à sua volta (Abramowicz, 1990; Abramowicz *et al*, 1993). Se uma densidade constante de matéria é assumida dentro do objecto, existe uma região aonde a força centrífuga se dirige na direcção do interior da estrela, para $R_s/2M < 1.5$ (Miller, 1992; Abramowicz, 1990). O mesmo se espera que aconteça para pulsares, pois a métrica é a MSP e embora aqui a distribuição de massa esteja mais concentrada no interior da estrela, aumentando da superfície para o centro, este efeito deverá existir, e pode afectar não só o movimento do plasma, mas também a estabilidade da estrela.

A métrica das magnetosfera influencia o movimento do plasma, não só através de si própria, e através do CEM dipolar, mas também através da descrição q-clássica do movimento, condições bastante diferentes do caso Minkowskiano. Neste caso a descrição clássica calcula os campos pelo método dos potenciais de Liénhard e Wieckert (PLW), a descrição quântica da radiação assume um processo de Markov descontínuo, e o processo fecha-se notando-se que neste contexto se verifica o Princípio de Huyghens. Em espaços-G porém sabe-se não ser válido o Princípio de Huyghens e a descrição clássica dos campos não pode ser feita só através dos PLW visto que a história anterior conta (Andrade, 1994); pelo que na descrição quântica em espaços-G a radiação de fotões já não é um efeito de Markov descontínuo, mas tem de reflectir a história anterior. O problema é muito mais complexo.

Esta influência depende da razão $R_s/2M$. Se $R_s/2M > 2$ poderemos esperar poucas diferenças da descrição em espaço-M. Contudo, se $1 < R_s/2M < 2$ há efeitos fortes que podem convergir para afectar a estabilidade da estrela e o movimento de plasma no exterior, particularmente à superfície. Este problema de estabilidade pode explicar porque não se observam estrelas de neutrões com $M > 2M_{\odot}$.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para explicar os mecanismos de radiação de pulsares, procurámos um modelo da sua magnetosfera. Conseguimos separar os efeitos electromagnéticos dos efeitos puramente geometrodinâmicos. Vimos em detalhe o caso em que a magnetosfera é espaço de Minkowski, como se pode explicar a radiação observada em radio frequência e radiação -γ e enunciámos alguns problemas introduzidos pela descrição geometrodinâmica.

A investigação em pulsares tem ainda um longo caminho a percorrer. As condições extremas existentes em estrelas de neutrões exigem novos desenvolvimentos da Física.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho no que respeita a espaços de Minkowski foi desenvolvido em estreita colaboração com o Professor F.D. Kahn, FRS. Agradece-se ainda ao Professor M. de Abreu Faro o encorajamento para a realização deste trabalho; e ao Professor David Berry pelas trocas de impressões no contexto do modelo estatístico.

Desde Janeiro de 1993 este trabalho tem sido desenvolvido no quadro do projecto STRDB/C/PRO/996/92, financiado pela Junta Nacional de Investigação Científica e Tecnológica.

BIBLIOGRAFIA

Abramowicz, M.A., 1990, *Mon. Not. R. astr. Soc.*, **245**, 733.

Abramowicz, M.A., Miller, J.C. & Stuchlik, Z., 1993, *Phys. Rev.D*, **47**, 1440.

Andrade, Z 1994, Dissertação de Mestrado de Física e Engenharia de Plasmas, Departamento de Física, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa

Ardavan, H., 1994, Mon. Not. R. astr. Soc, **268**, 361

Camilo, F., 1995, Proc. do NATO ASI ***The Lives of the Neutron Stars,*** Kemer, Antalya, Turquia, Agosto/Setembro de 1993, ed. M. A. Alpar, U. Kiziloglu e J. van Paradijs, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Holanda, pag. 225

Cordes, J.M., 1979, *Space Sci. Rev.*, **24**, 567

da Costa, A.A. (1976) Ph.D. Thesis, Astronomy Department,University of Manchester, England

da Costa, A.A., 1983, *Mon. Not. R. astr. Soc*, **204**, 1125

da Costa, A.A., 1994, Proc. of the Conference ***Kinematics and Dynamics of Diffuse Astrophysical Media,*** em honra de F. D. Kahn, eds. J.E. Dyson & E.B. Carling, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Holanda, paq. 179

da Costa, A.A., 1995, Proc. of the NATO ASI ***The Lives of the Neutron Stars,*** eds. M. A. Alpar & J. van Paradijs, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Holanda, paq. 259

da Costa, A.A. & Kahn, F.D., 1982, *Mon. Not. R. astr. Soc*, **199**, 211

da Costa, A.A. & Kahn, F.D., 1985, *Mon. Not. R. astr. Soc*, **215**, 701

da Costa, A.A. & Kahn, F.D., 1991, *Mon. Not. R. astr. Soc*, **251**, 681

da Costa, A.A. & Kahn, F.D., 1995, *Mon. Not. R. astr. Soc*,, submetido

Deutsch, A.J., 1955, *Ann. d'Astrophys.*, **18**, 1

Dewey, R.J. 1989, Proc. of the NATO ASI ***Timing Neutron Stars,*** eds. H. Ogelman & E.P.J. van den Heuvel, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Holanda, pag. 573

d' Inverno, R. (ed.) 1992, ***Approaches to Numerical Relativity,*** Cambridge University Press, UK

Dirac, P.A.M., 1938, *Proc. Roy. Soc. Lond. A*,**167**, 148

Fitzpatrick, R. & Mestel, L., 1988a, *Mon. Not. R. astr. Soc*, **232**, 277

Fitzpatrick, R. & Mestel, L., 1988b, *Mon. Not. R. astr. Soc*, **232**, 303

Ginzburg, V.L., 1989, ***Applications of Electrodynamics in Theoretical Physics and Astrophysics,*** Gordon Breach Science Publishers, London, UK

Gold, T. 1968, *Nature*, **218**,731

Goldreich, P. & Julian, W., 1969, *Astrophys. J.*, **157**, 869

Hartle, J.B. 1967, *Astrophys. J.*, **150**, 1005

Hernandez, W.C. 1967, *Phys. Rev.*, **159**, 1070

Irvine, J.M., 1978, ***Neutron Stars,*** Clarendon press, Oxford, UK

Kahn, F.D. & da Costa, A.A., 1974, Proc. of the ARW ***Cosmical Magnetism,*** Cambridge, UK, Julho de 1993, ed. D. Lynden-Bell, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Holanda, pag. 99

Kippenhahn, R & Weigert, A., 1990, ***Stellar Structure and Evolution,*** Springer-verlag, Berlim

Kirk, J.G., 1980, *Astron. & Astrophys.*, **82**, 262

Manchester, R.N. & Taylor, J.H., 1977, Pulsars, W.H. Freeman & co., San Francisco

Mestel, L., 1981, *Nature Phys. Sci.*, **223**, 149

Mestel, L., Wright, G.A.E. & Westfold, K.D., 1976, Mon. Not. R. astr. Soc, **175**, 257

Miller, J.C., 1992, in d'Inverno (1992), p. 114

Rees, M.J. (1971) *Nature*, **229**, 312

Rickett, B.J., Hankins, T. H. & Cordes, J. M., 1975, *Astrophys. J.*, **201**, 425

Ruderman, M. & Sutherland, P.G. 1975, *Astrophys. J.*, **195**, 51

Schapiro, S.L., & Teukolsky, S.A., ***Black Holes, Wite Dwarfs, and Neutron Stars,*** John Wiley & Sons, New York

Schott,G.A., 1912, ***Electromagnetic Radiation,*** Cambridge University Press

Schwinger, J., 1949, *Phys. Rev.* **75**, 1912

Smith, S.C. & Centrella, J.M., 1992, in d' Inverno (1992), p. 163

Snyder, D.L. & Miller, M. I., 1991, ***Random Point Processes in Time and Space,*** Springer-Verlag, Berlim, Alemanha

Zhuravlev, V.I., Popov, M.V., 1992, Proc. of the IAU Colloquium nr. 128, ***The magnetospheric Structure and Emission mechanisms of Radio Pulsars,*** Lagow, Polónia, Junho de 1990, eds. T.H. Hankins, J.M. Rankin & J.A. Gil, Pedagogical University press, Zielona Gora, Polónia, pag. 329.

Palavras chave: sistemas não-simétricos, subespaços de *Krylov*, métodos descendentes, métodos de resíduo mínimal.

GMRES: UM ALGORITMO ITERATIVO PARA SISTEMAS LINEARES NÃO SIMÉTRICOS

José A. Sousa Rodrigues
Departamento de Matemática, I.S.T.
Original submetido em 16 de Junho de 1994

RESUMO

Apresentamos, aqui um método iterativo particularmente bem adaptado à resolução de sistemas lineares não-simétricos, o qual minimiza, em cada etapa, a norma do vector resíduo sobre um espaço de *Krylov*.

1. INTRODUÇÃO

Em Análise Numérica, um dos principais problemas computacionais é a resolução de sistemas lineares do tipo

$$Ax = b. \tag{1}$$

Estes problemas surgem, por exemplo, quando se usa um método de diferenças finitas ou de elementos finitos, para a resolução de soluções de equações com derivadas parciais, na resolução numérica de problemas não lineares.

Para sistemas lineares de baixa ordem, a aproximação clássica é feita através um método directo, tal como o de eliminação de Gauss. Estes métodos de resolução da solução de (1) baseiam-se na factorização da matriz *A*. Contudo, os sistemas lineares que surgem de problemas não académicos são de ordem arbitrariamente grande. Felizmente, as matrizes destes sistemas têm uma estrutura especial, com muitos coeficientes nulos, pelo que muitas vezes os métodos directos podem ser adaptados para explorar essa estrutura. No entanto, em muitos casos uma aproximação directa é proibitiva atendendo à acumulação de erros de arredondamento e ao incremento no tempo de cálculo, que ela implica, pelo que a única alternativa é a utilização de métodos iterativos.

2. MÉTODOS ITERATIVOS E SUBESPAÇOS DE *KRYLOV*

Alguns dos métodos iterativos utilizados para resolver o sistema linear (1) são aplicados sobre subespaços de *Krylov*: com estes métodos, obtemos aproximações x_n de $A^{-1}b$ da forma

$$x_n \in x_0 + K_n(r_0, A), \quad n = 1, 2, \ldots \tag{2}$$

onde $x_0 \in \mathbb{R}^N$ é uma aproximação inicial da solução de (1), $r_0 = b - Ax_0$ é o respectivo vector resíduo, e $K_n(r_0, A)$ é o *n*-ésimo subespaço de *Krylov* gerado por r_0 e *A*, no sentido de

$$K_n(r_0, A) = \{\phi(A) r_0 : \phi \in P_{n-1}\},$$

sendo P_m o espaço dos polinómios de coeficientes reais de grau inferior ou igual a *m*. Em particular, o vector resíduo obtido na *n*-ésima iteração pode ser escrito da seguinte forma

$$r_n = b - Ax_n = \Psi_n(A) r_0, \tag{3}$$

com

$$\Psi_n \in P_n \quad \wedge \quad \Psi_n(0) = 1. \tag{4}$$

Como facilmente se depreende de (3), o objectivo dos métodos desta classe é em cada etapa, a determinação dum polinómio Ψ_n que satisfaça (3) e (4), e ainda tal que $r_0 \approx 0$. O problema inicial (1) é desta forma reduzido a um problema de minimização, para uma dada norma [1], sobre os subespaços de *Krylov*:

$$\|r_n\| = \min_{x \in x_0 + K_n(r_0, A)} \|b - A x_0\| \tag{5}$$

3. O ALGORITMO DE GMRES

Dos sistemas lineares do tipo (1), destacam-se aqueles que resultam da discretização de operadores não-simétricos, onde por consequência a matriz *A* é não-simétrica. Para a resolução deste tipo de sistemas foram feitas generalizações aos algoritmos dos métodos iterativos clássicos, que produzem aproximações aceitáveis para certas classes de matrizes não-simétricas. Em 1986, Saad e Schultz apresentaram em [1] um algoritmo geral, particularmente elegante, para a resolução destes sistemas lineares, o qual denominaram *algoritmo de GMRES* (Generalized Minimal RESidual algorithm). Sendo este algoritmo da classe referida na secção anterior, fornece-nos aproximações da solução do sistema (1) do tipo (2) e cuja a norma do resíduo verifica (5), sem que seja necessário calcular em cada etapa x_n.

Algoritmo 1 (*Algoritmo de GMRES*)

- *A matriz A, o vector* x_0, *o segundo membro* β *e a precisão* ε *são dados;*
- $r_0 = b - A x_0$ *resíduo inicial;*
- $sm(1) = \|r_0\|$;
- $v_1 = \dfrac{r_0}{\|r_0\|}$ *primeiro vector de base do espaço de Krylov;*
- *Início de ciclo em* $n \geq 1$:
  - *Cálculo do n+1 vector de base*
    - $\omega_n = A v_n$
    - $h_{i,n} = (\omega_n, v_i), i = 1, \ldots, n$
    - $\omega_n = \omega_n - \sum_{i=1}^{n} h_{i,n} v_i$
    - $h_{n+1,i} = \|\omega_n\|$
    - $v_{n+1} = \dfrac{\omega_n}{\|\omega_n\|}$
  - *Factorização QR da matriz A em base* v_i
    - *Para* $i = 1, \ldots, n-1$, *fazer*

[1] Em geral utiliza-se a norma l_2.

$$\begin{pmatrix} h_{i,n} \\ h_{i+1,n} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_i & -s_i \\ s_i & c_i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h_{i,n} \\ h_{i+1,n} \end{pmatrix}$$

- $r = h_{n,n}$
- $h = h_{n+1,n}$
- $c_n = r/\sqrt{r^2 + h^2}$
- $s_n = -h/\sqrt{r^2 + h^2}$
- $h_{n,n} = c_n r - s_n h$

* *Multiplicação do segundo membro por Q*

- $sm(n+1) = s_n\, sm(n)$
- $sm(n) = c_n\, sm(n)$

* *Teste da norma do resíduo*

- *Se* $|sm(n+1)| \geq \varepsilon$ *reitere*
- *Caso contrário resolva o sistema* $Ry = sm$ *e prossiga*

- *Fim de ciclo em n*
- *Cálculo de* x_n

* $x_n = x_0 + \sum_{i \leq n} y_i v_i$

- *Fim do algoritmo.*

Para um sistema de dimensão *N*, o algoritmo (1) converge em, no máximo, *N* iterações, verificando-se o seguinte teorema de convergência (cf. [1]):

Teorema 1 *Sejam* $D = diag(d_{11}, \ldots, d_{NN})$ *e X uma matriz ortogonal, tais que*

$$A = X D X^{-1}.$$

Então, temos que

$$\|b - A x_n\| \leq \|X\| \|X^{-1}\| \|b - A x_0\| \sigma^n ;$$

com

$$\sigma^n = \min_{p \in P_n, p(0)=1} \left\{ \max_{i \leq n} \|p(d_{ii})\| \right\}.$$

4. APLICAÇÃO DO ALGORITMO DE GMRES

Consideremos o problema de convecção-difusão do tipo *Burger's* unidimensional, para exemplificar a convergência do algoritmo (1). A escolha deste problema não é aleatória, pois não obstante a sua simplicidade, este problema simula os mais importantes fenómenos computacionais da dinâ-

mica dos fluídos. Formulemos então o problema seguinte sobre o conjunto aberto]0, 1[:

$$a\frac{\partial x^2}{\partial s} - v\frac{\partial^2 x}{\partial s^2} = f \quad \text{em }]0,1[, \tag{6}$$

$$x(0) = 1, \tag{7}$$

$$x(1) = 0, \tag{8}$$

onde $a > 0$, $\mu > 0$ e f é uma função real de variável real tomada de forma a que a equação (6) admita solução.

Após discretização de (6), usando um método de diferenças finitas descentradas, obtemos para x positivo, o seguinte sistema de equações não lineares:

$$\begin{aligned} &a\frac{x_i^2 - x_{i-1}^2}{\Delta s} - v\frac{x_{i+1} + x_{i-1} - 2x_i}{\Delta s^2} = f_i, \\ &x_0 = 1, \\ &x_{N+1} = 0, \end{aligned} \tag{9}$$

de incógnitas $(x_i)_{i=1,N}$, com parâmetro de discretização $\Delta s = \frac{1}{N+1}$ e $f_i = f(x_i)$.

Usando o método de Newton, para linearizar o sistema (9), obtemos o seguinte algoritmo:

Algoritmo 2 ***(Método de Newton multidimensional)***

1. X^0 *e* ε *dados,*

2. para $k \geq 0$ *resolver o sistema linear*

$$J_f(X^k)Y^k = F(X^k)$$

3. $X^{k+1} = X^k - Y^k$,

4. iterar enquanto se verifique $\|F(X^k)\| > \varepsilon$

Aqui, $X^k \in \mathbb{R}^{N+2}$,

$$F(X) = a\frac{x_i^2 - x_{i-1}^2}{\Delta s} - v\frac{x_{i+1} + x_{i-1} - 2x_i}{\Delta s^2} = f_i$$

e $J_f(X)$ é a matriz Jacobiana de F em X.

Obtemos desta forma uma matriz $J_f(X)$ tridiagonal não-simétrica

$$J_f(X) = \begin{bmatrix} d_1 & b_1 & 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ a_1 & d_2 & b_2 & \ddots & & \vdots \\ 0 & a_2 & d_3 & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ \vdots & & \ddots & \ddots & \ddots & b_{N-1} \\ 0 & \cdots & \cdots & 0 & a_{N-1} & d_N \end{bmatrix}$$

onde

$$d_i = \frac{2ax_i}{\Delta s} + \frac{2v}{\Delta s^2} \quad i=1,\ldots,N$$

$$a_j = -\frac{2a}{\Delta s} - \frac{v}{\Delta s^2} \quad j=1,\ldots,N-1$$

$$b_j = -\frac{v}{\Delta s^2} \quad j=1,\ldots,N-1$$

Fazendo

$$f(s) = 4as^3 - 4as + 2v \tag{10}$$

a solução exacta do problema (6-8) será

$$x(s) = 1 - s^2. \tag{11}$$

Usando o algoritmo (2) com $\Delta s = 0.1$, $a = 1$ e $v = 1$ obtemos uma solução aproximada de (11), cujo erro associado converge quadraticamente para zero. Na resolução do sistema do passo 2, do algoritmo 2, usamos o algoritmo de *GMRES* (1) o qual em cada iteração de (2) converge antes de 9 iterações, como previsto teoricamente, com um comportamento similar ao exposto na Figura. 1. A eficiência deste algoritmo é superior quando utilizamos uma matriz de pré-condicionamento $C^{-1}(X)$ para a matriz $J_F(X)$, principalmente quando $v > a$.

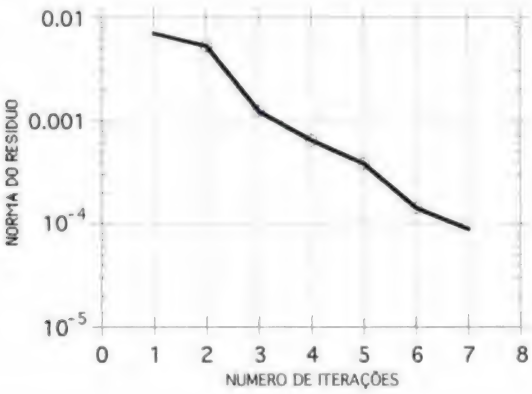


Fig. 1 O algoritmo converge antes de 9 iterações, como teoricamente se previa.

O algoritmo de *GMRES* fornece em cada etapa, e sem cálculos adicionais, a factorização *QR* da matriz *A* em base $K_n(r_0, A)$, utilizando rotações no plano. Obtém-se também a norma do resíduo da aproximação x_n, sem que seja necessário calcular esta aproximação. Este facto constitui uma das grandes vantagens deste algoritmo, além de fornecer um óptimo critério de paragem.

Não obstante o elevado número de vectores que o algoritmo 1 utiliza em memória central, a sua programação não apresenta dificuldades especiais, havendo somente a notar que as matrizes *Q* e *R* têm de ser armazenadas em memória central com especial atenção, atendendo a que são matrizes triangulares, construidas coluna a coluna, cuja dimensão aumenta em cada iteração do algoritmo.

BIBLIOGRAFIA

[1] Saad, Y. e Schultz, M.H. – GMRES: A generalized minimal residual algorithm for solving nonsymetric linear systems, *SIAM J. Sci. Stat. Comput.* **7**, 856-869 (1986)

aeist

Associação dos Estudantes do
Instituto Superior Técnico

Secção de Folhas

Somos especialistas em fotocópias de qualidade!

Fotocópias a cores e a preto.

Encadernações e plastificações.

Impressão rápida e entrega imediata.

Temos os melhores preços do mercado!

Contacte-nos!

Av. Rovisco Pais
1000 Lisboa

Tel.: 848 08 80
Fax: 848 40 14

CALIBRAÇÃO DE OPACIMETROS DE UNIDADES DE FABRICO DE PASTA DE CELULOSE

João F.P. Gomes
Centro de Tecnologias Ambientais
Original submetido em 21 de Setembro de 1995

RESUMO

Neste trabalho descreve-se a metodologia e as técnicas específicas de calibração de analisadores automáticos de emissões industriais com relevo particular para os medidores de emissões de partículas totais em suspensão da indústria de fabrico de pasta de celulose, sendo analisadas as implicações do cumprimento da Portaria N.º 286/93 sobre a qualidade do ar.

A calibração de opacimetros resulta, devido aos parâmetros e variáveis em jogo, numa relação multivariável, o que não se encontra de acordo com a calibração bidimensional que é efectuada na prática.

Para o caso de uma fonte emissora da industria de produção da pasta de celulose, que está sujeita a grandes variações operacionais, que é a chaminé da caldeira de recuperação, são analisados em pormenor os efeitos ponderais de cada variável em jogo, como sejam, a humidade e a temperatura do gás, desvios ao isocinetismo, distribuição da granulometria das partículas e transmitancia caracteristica dos opacimetros.

A análise multivariável de uma série relativamente grande de dados obtida ao longo dos anos nas unidades fabris nacionais, conduz a uma influencia de cerca de 98% de peso da transmitancia sobre as restantes variáveis, com um nível de significancia superior a 0,99, o que aponta para uma validação das calibrações bidimensionais efectuadas.

1. SITUAÇÃO DO PROBLEMA

Com a entrada em vigor da Portaria N.º 286/93 para todas as instalações industriais existentes, o que ocorrerá em Novembro de 1995 como consequencia do disposto no Decreto-Lei N.º 352/90, coloca-se mais prementemente o problema da calibração dos analisadores em contínuo o que terá que verificar-se obrigatoriamente uma vez por ano para as instalações abrangidas pelo Anexo VII da referida Portaria, ou seja, para todas as instalações que tem taxas de emissão (a taxa de emissão é igual ao produto da concentração do poluente pelo caudal de gás) superiores aos limites que constam desse anexo (1).

De facto, para uma chaminé industrial abrangida pela Portaria N.º 286/93, ou seja, uma fonte estacionária fixa, podem ocorrer duas situações distintas:

i) a concentração de poluente emitido encontra-se em conformidade com o valor limite aplicável (geral ou sectorial) sendo inferior a este.

ii) a concentração de poluente emitido não se encontra em conformidade com a legislação sendo superior ao valor limite

Conjugando esta informação com o caudal de gás emitido (ou seja poluente e gás veiculante) obtem-se então a taxa de emissão e novas situações se podem dar:

a) verifica-se i) mas a taxa de emissão é superior ao especificado.

b) verifica-se i) mas a taxa de emissão é inferior ao especificado

c) verifica-se ii), o que implica a tomada de acções correctivas como segue:

c 1) depois das acções correctivas já se verifica i).

c-2) mesmo depois das acções correctivas ainda se verifica ii).

Em termos de monitorização de acordo com os termos da legislação tem-se então que: para os casos a) e c-2) a legislação obriga à instalação de medidores em contínuo do poluente em causa, enquanto que para os restantes poluentes apenas obriga à monitorização pontual efectuada 2 vezes por ano.

A monitorização pontual terá que ser efectuada com equipamento adequado e segundo os métodos USEPA ou as correspondentes normas portuguesas.

Mesmo no caso em que existam medidores em contínuo, terá que ser efectuada, anualmente, pelo menos, uma medição pontual que servirá de calibração para os analisadores automáticos. A este respeito ver o fluxograma que se apresenta na figura 1.

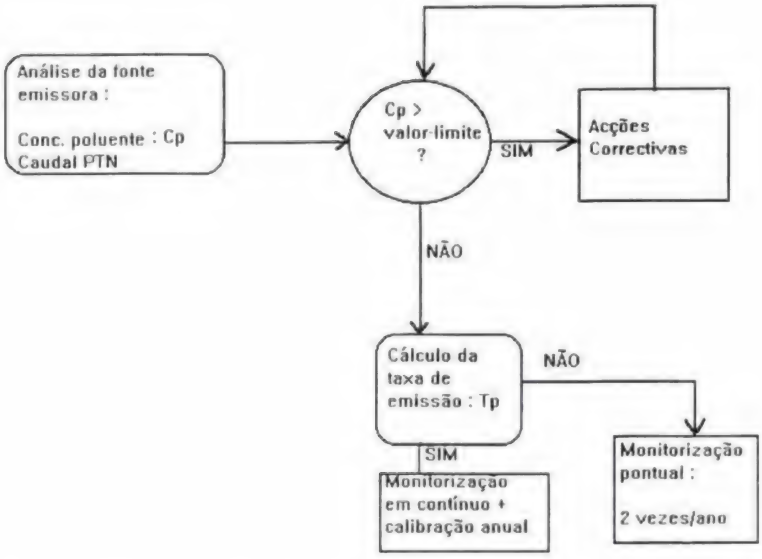


Fig. 1 Fluxograma indicativo do sistema de monitorização a adoptar segundo a Portaria N.º 286/93

No que diz respeito à calibração dos analisadores automáticos, esta far-se-à sempre com base num método absoluto USEPA ou equivalente uma vez que estes métodos são muito mais exactos e menos sujeitos a interferencias num ambiente industrial agressivo do que qualquer analisador automático.

Na verdade, enquanto o método absoluto por via húmida (USEPA ou equivalente) está geralmente bem estudado e quantificado em termos de interferencias, conduzindo a resultados representativos se forem observados os respectivos preceitos; qualquer método instrumental não é absoluto pois carece de calibração até mesmo porque os equipamentos de medida são, na maior parte dos casos, "standard" e não adaptados especificamente à medição e fonte em causa além de se basearem na medida de um sinal electrónico que é sempre falível uma vez que está sujeito a um grande número de interferencias físicas e químicas assim como a variação do sinal face a variações das condições ambientais e/ou operatórias na fonte emissora.

No caso dos analisadores de gases a calibração é feita a partir de tubos de permeação ou com garrafas de gases padrão, sendo, em geral a primeira técnica mais fiável do que a segunda uma vez que, para muitos gases a concentração das espécies altera-se por reacção química ou decai em consequencia da variação da pressão na garrafa.

Encontram-se já publicadas, ou em curso de publicação, diversas normas ISO que referem procedimentos exaustivos (com mais de 20 ensaios comparativos para cada concentração) para a calibração dos analisadores de gases sendo o método padrão o método de determinação do poluente por química húmida, segundo método USEPA ou equivalente.

No caso dos analisadores de partículas o procedimento de calibração é mais complexo uma vez que, neste caso, não existem nem garrafas de gases padrão nem tubos de permeação aplicáveis a esta situação. É a este tipo de analisadores que nos referiremos em seguida.

2. ANALISADORES AUTOMÁTICOS DE PARTÍCULAS TOTAIS EM SUSPENSÃO

Os analisadores automáticos para partículas totais em suspensão geralmente utilizados na indústria são de dois grandes tipos: os analisadores β e

ABSTRACT

This paper describes the methodology and specific techniques for calibrating automatic on-line industrial emission analysers, mainly equipments for measuring total suspended dust analysers installed in pulp mills within the scope of Portaria N.º 286/93 on air quality.

The calibration of opacimeters is a multi-parameter relationship instead of the bidimensional calibration which is used in industrial practice. For a stationary source from a pulp mill such as the recovery boiler stack, which is subjected to significant variations, the effects of parameters such as the humidity and gas temperature, deviations on isokinetism, size range of particles and characteristic transmitance of equipment are analysed.

The multi-variable analysis of a considerable set of data leads to an estimate of about 98% of equipment transmitance over the other parameters with a level of significance greater than 0,99 which is a validation of the bidimensional practical calibrations.

os opacímetros a que correspondem 2 princípios de funcionamento distintos. O primeiro tipo utiliza uma fonte radioactiva emissora β que é deflectida por partículas em suspensão no gás veiculante. Se bem que este tipo de analisadores conduza, em geral, a resultados mais exactos do que os opacimetros, estes últimos são geralmente mais utilizados na indústria o que é devido ao elevado custo de investimento e instalação assim como elevados custos de manutenção, uma vez que requerem intervenções frequentes e, eventualmente, a substituição periódica da fonte radioactiva.

Por outro lado, o opacimetro tem custos de investimento, instalação e manutenção mais baixos. Baseia-se no princípio da absorção e/ou deflecção da radiação luminosa de um dado comprimento de onda pelas partículas em suspensão no gás veiculante que atravessa o percurso dessa radiação (quer este seja diametral ou angular).

Na prática os equipamentos deste tipo não medem o teor de partículas mas sim transmissão ou absorção de luz, o que se relaciona com a opacidade, sendo esta a razão pelo que estes equipamentos se designam por opacimetros.

A extinção da luz é, de facto, uma propriedade dos aerossoís, quer seja medida dentro de uma chaminé ou de uma conduta, e pode ser expressa em termos de percentagem da luz transmitida (T = transmitancia), Op (opacidade) ou um número em escalas de densidade de fumos tais como Ringelmann, Bacharach, etc.

A relação entre a transmitancia da luz e a opacidade da pluma de gases é dada por:

$$T = 100 - Op \qquad \text{(eq. 1)}$$

Note-se que a opacidade medida no interior da fonte emissora não é, necessariamente, igual à opacidade da pluma de gases fora desta. As diferenças entre estas duas opacidades têm a ver com as diferenças existentes entre as dimensões da pluma dentro e fora da fonte, diferenças nas condições de iluminação e variações na humidade dos gases causadas pelo arrefecimento da atmosfera exterior (2).

Como se sabe, a transmissão de luz através de um aerossol pode ser descrita pela lei de Lambert-Beer:

$$I/I_0 = \exp(-b\,L) \qquad \text{(eq. 2)}$$

sendo:

I/I_0 = fracção de luz incidente transmitida

b = coeficiente de extinção

L = comprimento do percurso de luz

O coeficiente de extinção b para um aerossol de diversos tamanhos desde o raio r1 a r2 é dado por:

$$b = \int Q_{ext}(r1\ \lambda 1\ m)\, a(r)\, n(r)\, dr \qquad \text{(eq. 3)}$$

em que:

Q_{ext} = factor de eficiencia de extinção da luz para uma partícula de raio r, índice de refracção m, sendo o comprimento de onda da radiação l

a(r) = área projectada da partícula (πr^2 para partículas esféricas)

n(r) = função de distribuição dos tamanhos das partículas

O coeficiente de extinção pode ser calculado através das equações de Mie (3) considerando partículas esféricas ou de qualquer outra forma.

A lei de Lambert-Beer pode ainda ser escrita na forma de uma relação entre a transmitancia I/I_0 e a concentração mássica de partículas W, usando o parâmetro K definido por Pilat e Ensor (4) como segue:

$$K = (\text{volume total de partículas} / \text{volume de gás veiculante})(cm3/m3) / \\ / (\text{coeficiente de extinção da luz})(m-1) \qquad \text{(eq. 4)}$$

ou seja:

$$K = W/\rho b \qquad \text{(eq. 5)}$$

com:

p = densidade média das partículas (g/cm3)
W = concentração mássica das partículas (g/m3)

Substituindo b, como dado pela equação 5, na equação 2, vem:

$$I/I_0 = \exp(LW/K\rho) \qquad \text{(eq. 6)}$$

e resolvendo esta equação em termos da concentração mássica W, vem:

$$W = -(K\rho/L)\ln(I/I_0) \qquad \text{(eq. 7)}$$

O parâmetro K pode ser calculado utilizando a teoria de Mie desde que a distribuição de tamanhos e a forma das partículas seja conhecida. Pilat e Ensor (5) efectuaram cálculos de K usando distribuições de frequencia de tamanhos tais como log-normal e a teoria de Mie. A figura 2, cf. Carssen et al. (6) apresenta os cálculos de K como função do raio médio das partículas rgw com vários valores do desvio padrão geométrico σg para um índice de refracção das partículas de 1,5 e um comprimento de onda da luz de 1,2 mm.

Este índice de refracção de 1,5 considera-se ser o típico das partículas emitidas por uma caldeira de recuperação da indústria de pasta de celulose, conforme (7), situação esta que iremos abordar em seguida.

O comprimento de onda escolhido é também típico de diversos opacimetros industriais. Assim e, segundo Larssen (6) o valor verdadeiro de K para partículas tipicamente emitidas por caldeiras de recuperação deve encontrar-se entre os limites referidos na figura 2.

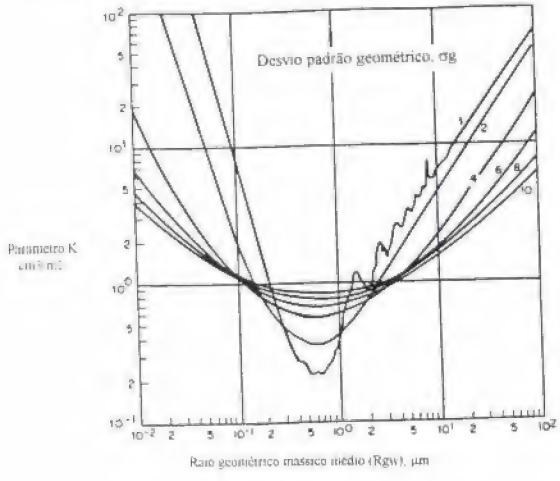


Fig. 2 Coeficiente K: volume específico de partículas/extinção, como função dos parametros de distribuição de tamanhos para um aerossol de partículas esféricas de índice de refracção 1,5 e um comprimento de onda de 1,2 mm, segundo Larssen (6).

3. CALIBRAÇÃO DE OPACIMETROS

Desde 1987 que o ISQ tem adquirido experiencia neste campo uma vez que procedeu já á calibração de todos os opacimetros existentes na indústria pesada nacional, a saber, cimenteira, siderúrgica e papeleira; com um especial destaque para esta última, uma vez que desde a entrada em vigor do contrato de programa entre a SEARN e a ACEL, sobre estas unidades industriais recairam, desde então, as obrigações que decorrem da Portaria N.º 286/93.

De facto, das várias fontes, tipos de indústria e unidades fabris em que estes trabalhos foram efectuados, o caso mais complexo e, como se verá, o das caldeiras de recuperação das unidades de produção de pasta de celulose.

Conforme já se viu, nas equações 3 e 7, a transmitancia ou a opacidade são extraordinariamente dependentes da natureza e tamanho das partículas emitidas, o que, por sua vez, depende também das condições processuais de operação tais como a temperatura, velocidade, humidade e composição dos gases.

Na prática, quando se faz a calibração de um opacimetro não é possivel tomar em linha de conta todas estas variáveis. Geralmente a calibração de opacimetros é efectuada de acordo com a Performance Specification 1 da USEPA, ou seja, admitem-se constantes todas estas variáveis e a resposta electrónica dos aparelhos (em mA ou %) é representada versus o teor de partículas em suspensão medido com um método absoluto como, por exemplo, o USEPA 5 (8). No mínimo efectuam-se duas medidas correspondentes a duas condições de operação distintas, alterando, por exemplo, o número de campos activos do sistema de despoeiramento instalado a montante da fonte emissora. Considera-se ainda um terceiro ponto fazendo corresponder uma opacidade de 0% a uma concentração nula de partículas.

Obtem-se uma representação gráfica como a que se apresenta na figura 3.

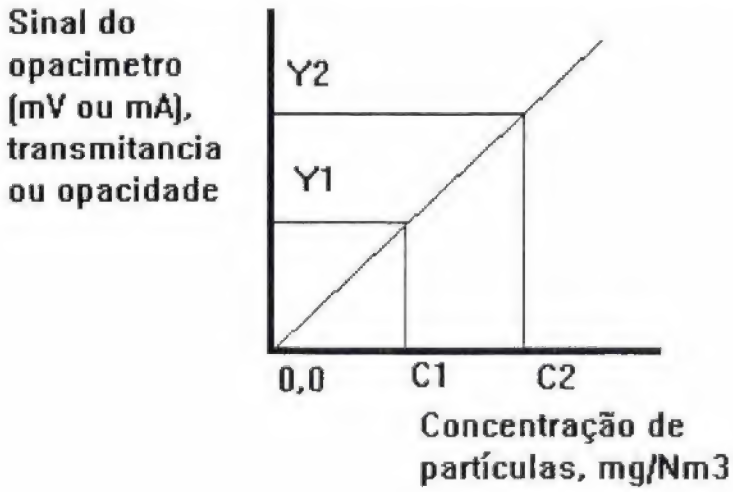


Fig. 3 Exemplo de "recta" de calibração com 3 pontos

Neste caso, a relação (aproximadamente) linear assim obtida pode escrever-se como:

$$Y = (Y2 - Y1)/(C2 - C1) \qquad \text{(eq. 8)}$$

que se considera ser a "recta" de calibração.

Naturalmente, é sempre aconselhável dispor de um numero maior de pontos e calcular a regressão, por exemplo, pelo método dos mínimos quadráticos, o que aumentará consideravelmente a representatividade da calibração desde que o coeficiente de correlação seja aceitável (9).

Conforme já se fez notar, este procedimento pressupõe que a opacidade é apenas dependente da concentração mássica de partículas mantendo-se constantes todas as outras variáveis atrás referidas.

Se bem que se possa admitir, sem grande erro, que isto acontece para determinadas fontes tais como chaminés de fornos de cimento e chaminés de fornos de fusão de aço em que, geralmente, as condições operatórias não variam muito, não variando também a natureza das matérias-primas e a natureza dos combustíveis, o que origina que seja pouco variável a forma e as dimensões das partículas emitidas, o mesmo já será mais difícil de aceitar relativamente ás chaminés de fornos de cal e, principalmente, nas chaminés de caldeiras de recuperação do processo kraft.

De facto, nestas últimas fontes, os regimes de funcionamento são, como se sabe, muito variáveis, de acordo com as necessidades processuais (10) o que origina que sejam utilizados por vezes combustíveis mistos diversos (fuelóleo+lixívia negra com teores diferentes de sólidos+gases mal-odorosos) em situações diferentes de operação (composição percentual, temperatura, humidade e velocidade dos gases) pelo que, em rigor, a calibração atrás descrita não deveria ser bidimensional mas a n dimensões, tantas quantas as variáveis envolvidas o que seria de todo impraticável.

Assim, e mesmo com toda a imprecisão associada a este processo, opta-se, geralmente, por aceitar a calibração conforme referida na Performance Specification 1 da USEPA.

Isto origina que nem sempre se obtenha uma boa concordancia entre as leituras consecutivas dos opacimetros entre duas calibrações, uma vez que as condições de operação não são, de facto, reprodutíveis.

4. INFLUÊNCIA RELATIVA DOS PARAMETROS NA CALIBRAÇÃO DE OPACIMETROS

Com os resultados de determinações efectuadas em chaminés de caldeiras de recuperação em diversas unidades fabris, e com o objectivo de calibração dos respectivos opacimetros, procurou-se determinar a influencia relativa dos vários parametros atrás referidos na variabilidade da regressão obtida para calibração.

As determinações de partículas totais em suspensão foram efectuadas segundo o método USEPA 5, e os parametros de escoamento foram medidos segundo os métodos USEPA 1 a 4, utilizando equipamentos Andersen segundo USEPA (12).

Os opacimetros eram, na sua maioria Sick, de diversos modelos e encontravam-se em bom funcionamento, tendo sido objecto de manutenção e limpeza antes dos ensaios.

As amostragens pontuais foram efectuadas em locais escolhidos de acordo com a norma NP 2176 e durante cada amostragem efectuou-se o registo dos sinais lidos nos opacimetros. A determinação da granulometria das partículas foi efectuada por microscopia óptica segundo o método descrito em (10).

De acordo com as equações anteriormente apresentadas foi delineada a seguinte equação de correlação entre as diversas variáveis em jogo:

$$W = A \ln(I/I_0) + B\,Ts + C\,fH_2O + D\,dgw + E\,\Delta l + F + e$$

sendo

A a F = coeficientes de regressão
Ts = temperatura do gás
fH_2O = fracção de humidade
DI = afastamento do isocinetismo da medição em relação a 100%
e = variação aleatória

Para efectuar a analise de regressão multivariáveis utilizou-se um programa de calculo automático com base no algoritmo descrito em (11), tendo-se obtido os valores que constam da Tabela 1.

Variável independente	Coeficiente de regressão	Coeficiente de regressão múltiplo (*)	Variação percentual relativa (%)	Nível de significancia
Transmitancia [1n(I/Io)]	2,75	0,9908	98,3	>0,99
Diâmetro das particulas (dgw)	-0,006	0,9925	0,37	>0,95
Desvio do isocinetismo (ΔI)	-0,004	0,9937	0,18	>0,75
Temperatura do gas (Ts)	0,0015	0,9938	0,07	0
Humidade do gás (fH2O)	0,007	0,9939	0,02	0
Variação aleatória (e)	-	-	1,06	-
		TOTAL	100	

(*) calculado após a adição de cada variável

Tabela 1 Análise de regressão multi-variável

De facto, com base nestes valores, pode concluir-se que a transmitancia representa, em grande maioria, o parametro com mais peso na correlação (98,3%) quando comparado com os restantes 1,7% que é a soma do peso de todos os outros factores.

Tem-se assim que, na gama de concentrações de partículas estudada e nas condições dos ensaios efectuados para as fontes em causa, a variação das condições operatórias (que, não foi, de facto, significativa durante os ensaios) é inferior a 2%.

Nestas condições, o tipo de calibração efectuada é significativo desde que o opacimetro esteja equipado com um dispositivo que lhe garanta uma intensidade constante da radiação emitida, assim como da radiação recebida e/ou do quociente I/Io, o que também se consegue com boa e frequente limpeza das lentes do aparelho.

BIBLIOGRAFIA

[1] Gomes, J.F.P., "A nova Portaria N.° 286/93 e as perspectivas da sua aplicação prática", Ingenium, 71, 39/45 (1993)

[2] Conner, W.D., Hodkinson, J.R., Public Health Service Publication 999-AP-30, Cincinnatti, 1967

[3] Van de Hulst, H.C., "Light scatering by small particles", John Wiley, New York, 1967

[4] Pilat, M.J., Ensor, D.S., Atmospheric Environemnt,4, 163 (1970)

[5] Pilat, M.J., Ensor, D.S., Bosch, J.C., Atmospheric Environment, 4, 671 (1970)

[6] Larssen, S., Ensor, D.S., Pilat, M.J., Tappi Journal, 55(1), 88 (1972)

[7] Hodgman, D.C. Ed., "Handbook of Chemistry and Physics", 44th Ed., CRC Press, Cleveland, 1962

[8] Gomes, J.F.P., "Qualidade do Ar", Edições Técnicas ISQ, Lisboa, 1993

[9] Gomes, J.F.P., "Validade do método dos mínimos quadráticos", Software, Ano 2, N.° 10, 3/4 (1986)

[10] Gomes, J.F.P., "Notice on a method for measuring size range of particles from stationary sources", in Multiphase Transport and Particulate Phenomena, Vol 3, Veziroglu Ed., Hemisphere Publ. Co., New York, 1990, 81/88

[11] Hader, R.J., Grandage, A.E., "Simple and multiple regression analysis", North Carolina State College Paper

[12] Gomes, J.F.P., "Monitoring of pollutant emissions using stack sampling techniques", in Industrial Air Pollution, A. Muezzinoglu Ed., Springer Verlag, Vol. G31, Berlin, 1992, 51/58

PROBABILISTIC WAVE MODELLING IN COASTAL WATERS

C. Guedes Soares
Secção Autónoma de Engenharia Naval e Unidade de Engenharia e Tecnologia Naval
Instituto Superior Técnico
Original submetido em 21 de Setembro de 1995

ABSTRACT

This paper presents a summary of the main achievements of the WAVEMOD project. This project aims at developing the methodology to combine data from different sources so as to reduce as much as possible the duration of the measurement campaigns that support the data base upon which the probabilistic models are constructed. It also aims at developing probabilistic models that are specifically applicable in coastal waters. The paper describes the field experiments aiming at calibrating data and describes the calibration of numerical models and remote sensed data. Finally the developments in spectral models, ARMA models and long-term models are described covering the different time scales of interest in the description of the wave climate.

1. INTRODUCTION

The aim of the WAVEMOD project is the development of a methodology for obtaining probabilistic models that describe the statistics of the wave environment in coastal sites. The development of coastal activities requires a relatively accurate knowledge of the wave conditions to be expected during the planned life of those activities. Since predictions are required over large periods of time in the future, only probabilistic statements have usefulness to support design or operational decisions.

Most of the probabilistic models that are available were developed to describe the wave climate and the sea states in ocean and offshore areas which are characterised by deep water conditions and inexistance of complex wave and current fields resulting from the topography of the coast or of the bottom. In this project, consideration is given to the applicability of different models to the conditions available in coastal waters [1-4] (see fig. 1).

In general, probabilistic modelling can be divided in the choice of the appropriate probabilistic model and on the assessment of the value of its parameters for the data under consideration. The confirmation of the adequacy of the model and the quantification of its parameters is made through the analysis of measured data on the site under consideration.

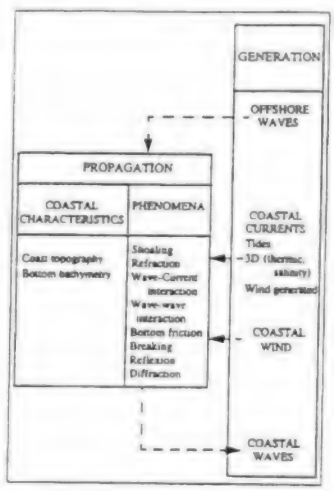


Fig. 1. Phenomena Generating the Coastal Waves [4]

Since for many applications long-term models are required, it is necessary to build-up a relatively long series of measurements before it can be an ade-

quate basis to fit models for predictions and extrapolations. This project deals also with the problem of constructing an adequate data base by using data of different sources in order to reduce the length of the measurement period that is necessary. Thus satellite data and numerically generated data are considered in order to calibrate their predictions with measurements data. The calibration procedure is supported by two short-term measurement campaigns.

2. FIELD EXPERIMENTS

In order to ensure that specific problems related with different local conditions will be identified and dealt with, two sites have been chosen with different bottom slopes, fetch and climatological conditions. They are in the Atlantic coast of Portugal and in the Northern coast of Crete in the Mediterranean [5].

An area on the exposed west coast of Portugal, just north of the city of Figueira da Foz, was identified for the Atlantic field experiment. The area was chosen due to its simple topography, with a relatively wide continental shelf, gently sloping bottom and depth contours nearly parallel to the coast. The wave climate was also fairly well known through long term wave measurements being made by the Portuguese Hydrographic Institute, which also assisted with buoy deployment.

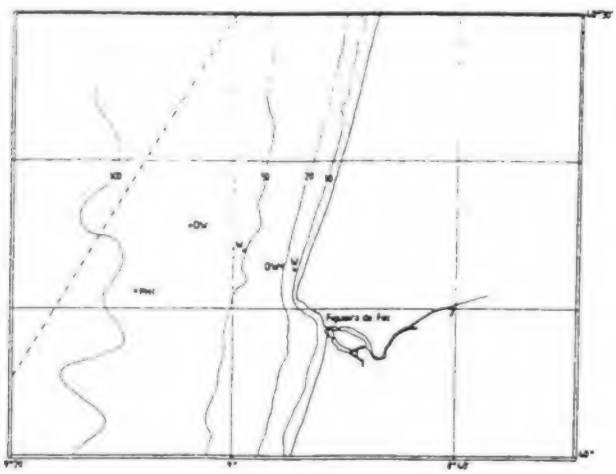


Fig. 2. Map of the Portuguese Field Experiment area. Location of Directional Waveriders are indicated by DW, WR for the Waverider, and PHI for the Portuguese Hydrographic Institute's directional buoy. The Topex/Poseidon ground track referred to in the text is indicated by the dashed line.

The wave climate in this area is swell dominated as a result of the frequent storms initiating further to the north. Local winds are predominantly northerly to north westerly. Wave directions are as a result predominantly north westerly although south-westerly storms do occur occasionally.

The field experiment consisted of the deployment of 3 wave buoys along a line almost perpendicular to the coast from October 1993 to May 1994. Directional Waveriders were placed in 20m and 72m water depth and a non-directional Waverider was located at 50m. The Waverider was moved to 12.5m depth in March 1994 to provide data from shallow water. The directional buoy operated by the Portuguese Hydrographic Institute was located close to the 100m contour a little to the south of the buoy array and provided data for the latter part of the experiment.

All the buoys transmitted directional spectra by way of the Argos satellite system whilst was data was stored internally in the buoys. In total, 180 days of directional spectra are now available from the 70m location, 150 days from 20m, and 90 and 80 days respectively from the Waverider at 50m and 12.5m depth. A composite time series of significant wave height, peak wave period and wave direction at the spectral peak is shown in Fig 3 for the duration of the experiment.

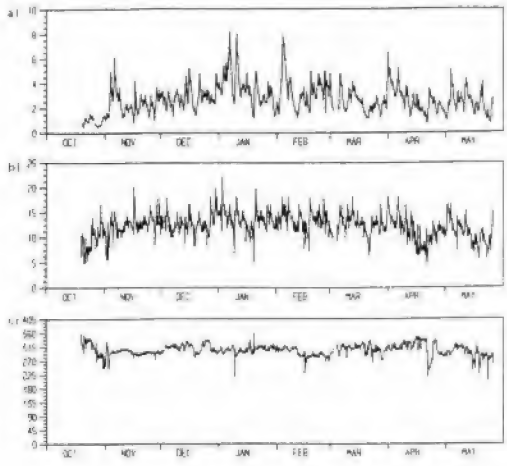


Fig. 3. Composite time series plots showing a) signicant wave height, b) peak wave period, and c) mean wave direction at the peak wave period from the directional Waveriders for the duration of the field experiment at Figueira da Foz [5].

The Mediterranean site was chosen, on the north-western coast of the island of Crete after considering potential sites in the Hellenic seas. A small bay, exposed to the north and situated on the western side of the town of Rethymnon was identified.

The choice was due to several factors: relatively long fetch in the Aegean sea, topography, sea conditions, wind conditions, and logistic facilities. The topography of the site chosen is not very complex and the slope is around 2.5%. As result, diffraction and reflection are not too important.

The site is essentially exposed to waves generated by the different local wind regimes with westerlies dominating. Northerlies are more common in summer. North easterlies also occur as a result of low pressure in the eastern Mediterranean. Although summer and winter climatology are quite different, severe sea conditions (Hs>4m) near shore may occur at any season. Wave directions at the site are predominantly north west to north east.

Three wave buoys were deployed along a line approximately perpendicular to the coast. Two directional waveriders were located at 10 and 100m metres water depth and one non directional waverider buoy was located at 20m depth. The campaign started on the 1st February 94 and continued until November 94. Both winter and summer sea conditions were covered. Three current-meters were also deployed near to each buoy at 8.5m below sea surface in order to measure the mean current velocity. The buoys transmitted raw data by means of VHF to a land station situated in a building of the Municipality of Rethymnon just above the site.

3. CALIBRATION OF NUMERICAL MODELS

The aim of this part of the project was to study the performance of hindcast models, as compared with measured data. The state of the art of wave

modelling is now in the so called models of third and even fourth generation, which rely heavily on the work of the WAM group [6]. These models are used operationally in the European Center for Medium Range Weather Forecasting (ECMRWF) producing forecasts on a global scale every six hours. These predictions are made for grid points typically 100 km apart, which represent an adequate coverage for ocean areas but is clearly inadequate for coastal waters where the scale of the spatial variability requires information at much shorter distances.

The difference between the second generation and third generation models is basically in the accuracy of dealing with the source term in the energy balance equation as well as with the non-linear wave interactions. However, the hindcast results are very sensitive to the input wave fields, which can have a much more severe impact on the uncertainty of the results than the differences between predictions of second and third generation models, as was shown recently [7,8].

In view of these results, the strategy of the work on this project was to concentrate on the use of second generation wave models, eventually with wind fields produced by a local wind model with higher resolution.

This choice resulted from considering on one hand that the objectives of this project were not the further development of these computationally heavy models for global predictions but instead interest was concentrated on models typically available at consulting companies dedicated to coastal engineering which will typically work with second generation models. Furthermore the findings just mentioned, indicated that the accuracy of the predictions may be more dependent on improving the description of the relevant wind fields, using a local wind model with a fine grid second generation model, than a third generation wave model with coarsely spaced grid points.

A wind model was developed [8,9] which improves the geostrophic wind fields by considering the effect of the boundary layer and calibration has been performed by using the predictions of wave fields based on them [8]. In this process one is automatically calibrating the wind and the wave model. The wave model adopted is based on the work of Holthuijsen and Boer [10]. It is a discrete spectral model with implicit coupled wave-wave interactions included for the region around the forecast point. Wave propagation is achieved with a tracing technique along straight rays radiating from the forecast point. The generation and dissipation of each spectral component is obtained by using the analytical solution of linear and exponential growth or exponential decay per time step.

The results obtained so far have shown that by appropriately choosing the height of the boundary layer reasonable results can be obtained [8]. Although satisfactory results were obtained, it is still planned to conduct further calibrations even with the wind fields produced by the ECMWRF.

Another important information for coastal sites is the existing current, as a result of the different sources. This can be of interest on its own as well as in its interaction with the wave fields. A numerical model has also been developed so as to predict the tidal currents in the Portuguese coast [11].

4. CALIBRATION OF SATELLITE AND RADAR DATA

Different types of satellite data are available and have been used in the present project. Altimeter data provide only the value of significant wave height and wind speed along the paths of the satellite. The Synthetic Aperture Radar (SAR) provides images from where a full directional spectrum can be determined by means of inversion techniques. The usage of SAR ranges

from full resolution images for coastal studies to SAR wave mode data for global ocean coverage. Data is available from GEOSAT, ERS1 and more recently from Topex-Poseidon.

At present two satellite altimeters are operating. These are the European Space Agency's ERS-1 Satellite launched in 1991 and US/French Topex/Poseidon which was launched in 1991. It is planned that ERS-1 will be phased out in 1995 and substituted by ERS-2 to be launched then.

The exact repeat orbits vary from time intervals of one week to one month depending on the satellite and on the area under consideration. The tracks allow resolutions of 150 to 300Km which are acceptable for ocean areas but they are too coarse for coastal areas. In these areas one additional problem occurs when the satellite passes from land to sea, giving artificially high values of significant wave height.

Referring to the Portuguese field experiment described in section 2, it should be noted that the directional waverider at 72m was located near to Topex/Poseidon ground track (fig.2). The Portuguese Hydrographic Institute's buoy was similarly the located close to the ERS-1 ground track.

Calibration studies on the GEOSAT significant wave height have shown a consistent downward bias of 13%, to be modified for low sea states. The ERS-1 produces significant wave heights that are significantly biased and needs to be corrected before use. However, the Topex/Poseidon appear to provide close to bias-free measurements [12]. Globally, it is generally accepted that if the global altimeter data is quality controlled and is corrected to remove systematic biases then accurate data is obtained.

An example of the use of altimeter data to construct a database in the coastal area of Figueira da Foz can be found in [13].

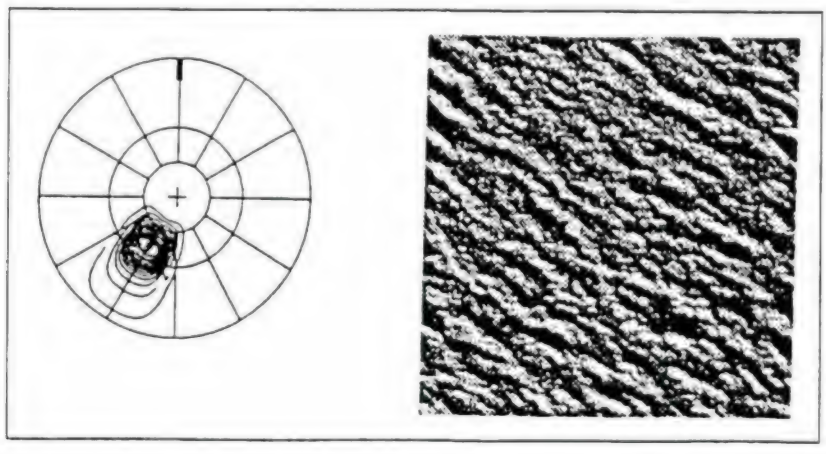


Fig. 4. Inverted directional wave spectra and corresponding SAR image [5].

The Synthetic Aperture Radar produces images of the ocean surface with very high resolution which need to go through a complicated post-processing before extracting quantitative wave observation. The main algorithm is the non-linear ocean spectral inversion [14, 15]. The transformation yields an analytical expression corresponding to a given wave spectrum. The inversion procedure corresponds to finding the ocean wave spectrum such that when the forward ocean SAR transformation is applied to it, the results transform to the observed SAR spectra (fig. 4).

Despite this procedure being routinely applied, problems exist still to be solved. The current resolution limits the observations to waves longer than about 40m. Furthermore the SAR image is symmetric and thus suffers from 180° ambiguity in direction. There is also a marked alteration in the direction

parallel to the radar propagation. The azimuth cut-off masks waves travelling parallel to the radar [12].

The ERS-1 provides images operationally. One image covers a square of 100km × 100km and can be delivered as fast product (5000 × 6300 pixels) or high resolution (8000 × 8200 pixels). Smaller wave mode imagettes are also available (400 × 600 pixels).

Recently an experimental installation of a radar has been made close to Bilbao in the Northern coast of Spain. The radar is providing images that have some similarities with the satellite images. In fact, the method of obtaining images from an X-band radar is based on the effect of the capillary waves produced by wind, which produce interference patterns on the radar screen.

It is possible to obtain directional wave spectra from these images and it was shown [16, 17] that these can be more precise than the buoy data, as concerns the directionality properties. There are however ambiguities that need to be resolved concerning the direction of propagation and the absolute value of the variance. Furthermore, without local wind there are no capillary waves and no image can be obtained.

5. SPECTRAL MODELS

5.1. Scalar Spectrum

Over relatively short periods of time and relatively limited ocean areas, the elevation of the sea surface is modelled as a zero mean stationary and ergodig Gaussian process. As such, it can be completely described by a power spectral density function, from which the variance of the process can be calculated.

This function includes information about the distribution of wave energy over the different frequencies, which is very important to several engineering applications. A more comprehensive description is the directional wave spectra, which provides additional information about the directional spread of energy as a function of wave frequency.

At present several theoretical models have been proposed to describe wind waves in developing sea states and in saturated sea states. Both of these models rely on the Phillips model for the high frequency tail of the spectrum, which is dependent on the power -5 of the frequency [18]. However some evidence in measurements has shown that a different dependence may be present and theoretical works of Kitaigorodsky and Phillips have also pointed in that direction. This specific question has been studied in this project by analysing data from the two measurement sites described in section 2.

In fact, it was found that typically the exponent will vary from -3.5 to -4.5, depending on the value of Hs and Tz. A clear tendency has been shown by the long term data from Figueira da Foz. It is believed that this variation is related with the state of development of the sea state, which is clearly related with its parameters Hs and Tz.

Another factor predicted by the theory is the effect of finite water depth. While the theory predicts that in infinite depth it should be -5, an asymptotic value of -3.5 occurs for shallow water. This variation has in fact been observed in the measured data in different depth as reported in [18].

The findings about the high frequency tail of the spectrum have been complemented with a method to predict the evolution of the stage of the spectrum with decreasing water depth, taking into account the effects of refraction and shoaling that are associated with them [19].

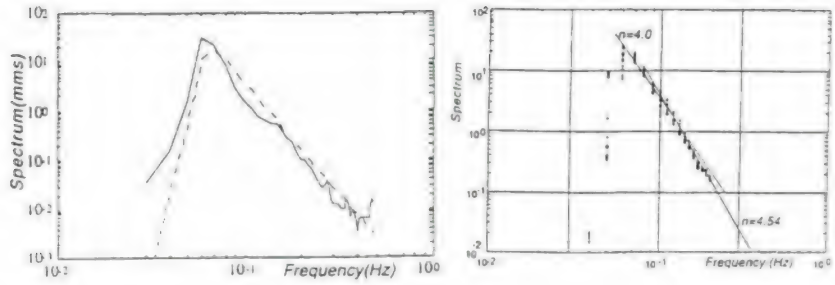


Fig. 5. a) Deep water inverted SAR spectra (dashed), Hs=2.8m. Data from a Waverider @ 72m water depth about 80km south of the site shown with a solid line (Hs=3.3m). b) Thirteen inverted SAR spectra from the outer part of the SAR scene illustrating f^n decay [18].

5.2. Directional Spectrum

Systematic data collection for the assessment of the directional spectrum has started relatively recently in different countries. While the scalar spectrum is derived from time histories of the elevation of a waverider buoy, the directional spectrum needs information about the roll and pitch of the buoys. This project has been considering the different methods presently available to determine the directional spectrum from wave records and to derive from them the directionality functions [20-22].

Preliminary results indicate that the basic parameters of the sea state such as for example the significant wave height will present non-negligible differences when determined from spectra estimated with the Fast Fourier Transform method or with the method of maximum entropy [22]. The latter is able to estimate spectra from shorter time series and is able to have different performance depending on the order of the autoregressive model adopted. However, there is not yet a clear criterium to determine the most appropriate order to adopt.

6. ARMA MODELS OF THE TIME SERIES OF SIGNIFICANT WAVE HEIGHT

The time series of significant wave height represents a non-stationary process in time in that it is very much affected by the seasonal trends. This is well depicted by autoregressive models of monthly mean values as shown in [23]. In fact, it has been shown that the periodic nature is so clear that one term of a Fourier series provides an adequate model for the seasonality involved [24].

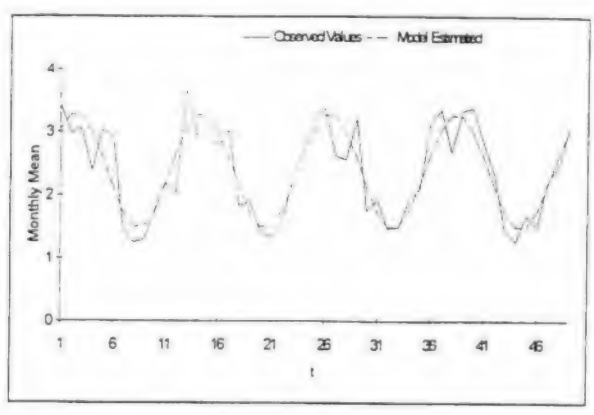


Fig. 6. Observed values and estimated model from the Fourier representation [24].

Modelling these seasonal effects allows the use of auto-regressive models to describe the deseasonalised series which in general can be described with models of orders ranging from 5 to about 20 although in this latter case only about six terms are non-zero.

The initial experience with these models indicate that they are not appropriate to forecast the time series because they tend very quickly to the mean value. However, simulated series show the same properties of the initial series and thus can be used for several studies that are concerned with other derived parameters.

One interesting application that was developed in the present project was the use of autoregressive models to fill the gaps of missing values in the time series. It was found that for relatively small gaps it was possible to make predictions from both sides of the gap but a finer model with orders of up to 65, was necessary for the purpose of fillings gaps of data [25].

However for long gaps of two or more weeks, which occur more often than desired, this method is not applicable. Instead, it was shown that one can use information from neighbouring measurement locations and by using transfer functions, to infer the missing data.

The method, which was presented in [25], consists of fitting high order models to the time series in close locations and then calculating the cross correlation between the residuals from the two series. The structure of the cross correlation function is determined from this analysis and then it is used to determine the residues at one location as a function of the residues at another.

The example shown in figure 7 shows an initial series of Figueira da Foz with two significant gaps at the begining and end of the record. The middle series showed that the method to fill gaps worked well in the second one, for which there was data from La Coruña, but it was not good in the first one which coincided with a gap in La Coruña also.

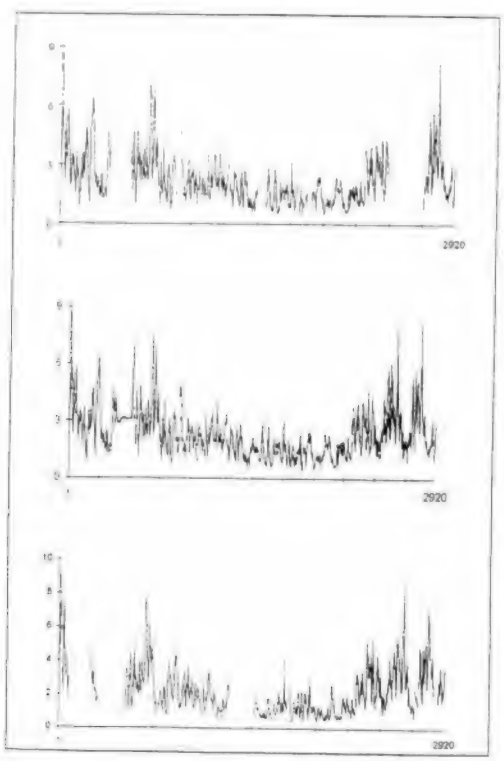


Fig. 7. a) Series from Figueira da Foz (1986) with the data of November removed. b) The series with filled gaps (in strong) based on the data from La Coruña. c) Time series from La Coruña (1986) [25].

The examples considered have shown that this method works whenever both locations are subjected to the same wave climate. In fact, using two stations located at approximately the same distance from a reference buoy, it was shown that in one case a good correlation was obtained while no correlation existed for the other where local disturbances existed.

Another approach to the modelling of time series can be found in [26] although applied to hindcast data from the North Atlantic.

7. LONG-TERM PROBABILITY MODELS

The description of the variability of the wave climate over periods of many years is of interest to design formulations of different types of fixed and floating structures. The current procedure is to organise a data set with several years of measurements, to fit a distribution and afterwards to extrapolate it to very low levels of probability.

This procedure has started to be critically examined in [27] where the concept of the underlying distribution was discussed pointing out that in general the current procedure would be indeed pooling together data that was from populations with different characteristics. This work was pursued in [28] where it was shown that the basic assumption that the data from successive years could be considered as a random sample from the same population was not supported in general by statistical tests of fit.

Another aspect of interest is related with the parametric models that are used to describe the significant wave height data. Frequently used models are the log-normal distribution, when concern is the lower to moderate range and the Weibull distribution when a better model of high sea states is aimed at. However, a combination of both have also been proposed [29], as well as the Gamma distribution [30].

The choice of the probabilistic models is often justified by a the visual appearance in a plot of probability paper. Furthermore, often the fit of the distribution i.e., the assessment of its parameters is made by the method of least squares which is a formalization of the method based on probability paper.

It was shown in [27] that when using other methods to fit distributions, such as the method of moments and the method of maximum likelihood, different values are obtained for the parameters. As expected, the difference on the parametric values are larger whenever the quality of the fit is not good.

The tests of goodness of fit can indicate whether a distribution should be rejected. However, often these tests are not robust enough to select only one distribution. This was shown in [31], where different distributions based on Beta functions were used and not rejected by the used tests of fit. It was argued that whenever extrapolations were made with Beta distributions with different tail behaviour they provided bounds to the extrapolated values to be expected.

The different long-term models of marginal distributions of significant wave height are adequate for several applications but not for all. In some situations it is necessary to model the bivariate distribution of significant wave height and mean or peak period.

The method that has been commonly used is to combine the marginal distribution of significant wave height with several distributions of period conditional on Hs [29]. However, several difficulties occur for high sea states, in which few observations are available and the fit of the conditional distributions is difficult.

Alternatives to this procedure is the use of the Placket model, which was proposed recently and applied to North Atlantic data [32], or the use of trans-

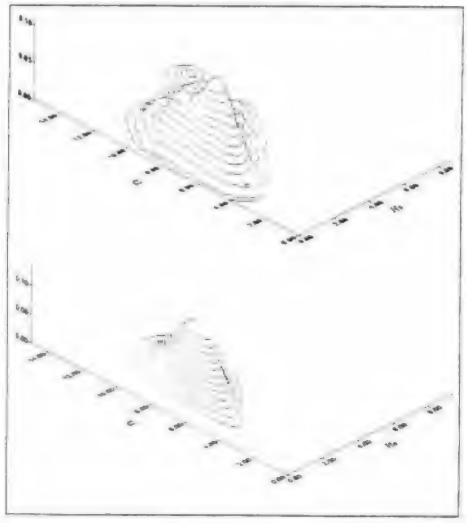


Fig. 8. Three dimensional plots of the Kernel density estimates of the (Hs, Tz) data of Figueira da Foz (I986/87) and the fitted density function [33].

formation of variables which was developed in the present project and applied to data of Figueira da Foz [33].

8. CONCLUSIONS

An overview has been presented of the work that has been performed roughly in the first part of the WAVEMOD project covering the field experiments to collect the data for calibration, the work to calibrate numerical models and remote sensed data and finally the new achievements as concerns the short term spectral modelling of sea states, the intermediate scale ARMA models of the sea state time series and the long term models used eventually for extrapolation to severe conditions of low probability of occurrence.

9. ACKNOWLEDGEMENTS

This paper is based on the work performed during the WAVEMOD project, "Probabilistic Methodology for Coastal Site Investigation Based on Stochastic Modelling of Waves and Currents", in part funded by the MAST II Programme of the European Union under contract n.° MAS2-CT92-0025. The participants in the project are Instituto Superior Técnico as project leader together with IFREMER, Laboratoire Hydraulique de France, National Technical University of Athens, MARTEDEC, Technical University of Delft, Clima Maritimo, SINTEF and OCEANOR. The paper has been presented at the Second MAST Days in Sorrento, Italy between 7-10 November 1995.

10. REFERENCES

[1] C. GUEDES SOARES, "Probabilistic Methodology for Coastal Site Investigation Based on Stochastic Modelling of Waves and Currents", *MAST Days*, Brussels, March 1993.

[2] M. PREVOSTO and M. PAILLARD, "Project MAST II WAVEMOD: Probabilistic Methodology for Coastal Site Investigation Based on Stochastic Modelling of Waves and Currents", *3 èmes Jornées Nationales Génie Civil - Génie Côtier*, Sète, France, March 1994.

[3] C. GUEDES SOARES, "Contribution of the Wavemod Project to the Understanding of the Wave Conditions off the Coast of Portugal", *Proceedings of the 1st Symposium on the Atlantic Iberian Continental Margin,* Gaia, Vol. 8, 1994, pp. 75-78.

[4] C. GUEDES SOARES, H. E. KROGSTAD and M. PREVOSTO, "Probabilistic Models for Coastal Site Investigations", *Proceedings OCEANS* 94, IEEE, 1994, Vol. I, pp. 493-497.

[5] S.F. BARSTOW, M. PAILLARD and C. GUEDES SOARES, "Field Measurements of Coastal Waves and Currents in Portugal and Greece in the WAVEMOD Project", *Proceedings OCEANS* 94, IEEE, 1994, Vol. I, pp. 487-492.

[6] G.J. KOMEN, L. CAVALIERI, M. DONELAN, K. HASSELMANN, S. HASSELMANN and P.A.E.M. JANSSEN, *Dynamics and Modelling of Ocean Waves,* Cambridge University Press, 1994.

[7] J.C. TEIXEIRA, M.P. ABREU and C. GUEDES SOARES, "Variability of Ocean Wave Hindcasts Due to Wind Models" *Proceedings of the 12th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering,* C. Guedes Soares, et al. (Ed.), 1993, Vol II, pp.125-133.

[8] L. H. HOLTHUIJSEN, N. BOIJ and L. BERTOTTI, "The Effect of Wind Errors on Ocean Wave Hindcasts", *Proceedings of the 12th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering,* C. Guedes Soares, et al. (Ed.), 1993, Vol. II, pp. 117-124.

[9] C. GUEDES SOARES, S. CAIRES and T. CALADO, "Hindcast of a Storm in the Portuguese Coast", *LITTORAL 94,* S. Carvalho e V. Gomes (Eds.), EUROCOAST Association, Portugal, 1994, Vol. I, pp.311 -325.

[10] HOLTHUIJSEN, L.H. and S. DE BOER, "Wave forecasting for moving and stationary targets", *Computer Modelling in Ocean Engineering,* B.A. Schrefler and O.C. Zienkiewicz, (Eds.) 1988, Balkema, Rotterdam, pp. 231-234.

[11] E. DAVID, M.L. GENCO, C. LE PROVOST and P. SAUVAGET "Modèles Numériques Emboités por l'Étude des Courants de Marée Côtiers", *Colloquium on Coastal Dynamics,* Paris, 1995.

[12] S. BARSTOW, and H. KROGSTAD, "Wave Climate Assessment by Satellite Remote Sensing", *Proceedings ISOPE'95, 1995.*

[13] P. CHARRIEZ and M. OLAGNON, "Relevance of Satellite Data for a Reliability Approach of Design Coastal Wave Estimation", *Proceedings of the 14th International Conference on Offshore Mechanics and Artic Engineering,* C. Guedes Soares (Ed.), 1995 Vol II, pp. 71-77.

[14] K. HASSELMANN and S. HASSELMANN, "On the Non-Linear Mapping of an Ocean Wave Spectrum into a Synthetic Aperture Radar Image Spectrum and its Inversion", *J. Geophys. Res.,* 1991, Vol. 96, n° C6, pp. 10, 713-10, 729.

[15] H.E. KROGSTAD, O. SAMSET and P.W. VACHON, "Generalisations of the Non-Linear Ocean-SAR Transformation and a Simplified SAR Inversion Algorithm", *Atmosphere and Ocean,* 1994, Vol. 32, pp. 61-82.

[16] J. C. NIETO and M. ALFONSO, "Study of the Accuracy and Uncertainties of Directional Wave Navigation Radar Measurements confronted with Pitch-Roll Buoy Data", *Proceedings of the 12th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering,* Vol. II, C. Guedes Soares, et al. (Ed.), Glasgow, 1993, pp. 135-141.

[17] J. C. NIETO, M. ALFONSO and R. SANZ, "Reliability of Measured Sea States using Radar System on Shore", *Proceedings of the 14th International Conference on Offshore Mechanics and Artic Engineering,* C. Guedes Soares (Ed.), 1995, Vol. II, pp. 63-70.

[18] M. PREVOSTO, H.E. KROGSTAD, S. BARSTOW and C. GUEDES SOARES, "Observations of the High Frequency Range of the Wave Spectrum", *Proceedings of the 14th International Conference on Offshore Mechanics and Artic Engineering,* C. Guedes Soares (Ed.), 1995, Vol. II, pp. 19-24.

[19] C. GUEDES SOARES and S. CAIRES, "Changes in Spectral Shape Due to the Effect of Finite Water Depth", *Proceedings of the 14th International Conference on Offshore Mechanics and Artic Engineering,* C. Guedes Soares (Ed.), 1995, Vol. II, pp. 547-556.

[20] O. HAUG and H. KROGSTAD, "Mathematical Theory for Directional Distributions in Ocean Wave Spectra," *WAVEMOD Report Tec 2.2-01(0)*, Mast Contract n° CT92/0025, 1993.

[21] M. ALFONSO and J.C. NIETO, "Estimation of Wave directional Properties from Buoy Records", *WAVEMOD Report Tec. 2.2-01(0)*, Mast Contract CT92/0025, 1993.

[22] D. GOMES and C. GUEDES SOARES, "Estimation of the directional spectrum with Maximum Entropy Methods", *WAVEMOD Report Tec. 2.2-03(0)*, Mast Contract n.° CT92/0025, 1995.

[23] C. GUEDES SOARES, and A.M. FERREIRA, "Analysis of the Seasonality in Non-Stationary Time Series of Significant Wave Height", *Computational Stochastic Mechanics*, P.D. Spanos (Ed.), A.A. Balkema, Rotterdam, 1995, pp. 559-578

[24] C. GUEDES SOARES, A.M. FERREIRA and C. CUNHA, "Auto-Regressive Model for the Long Term Series of Significant Wave Height in the Portuguese Coast", *Proceedings of the French-Portuguese Seminar on Modeling in Maritime Hydraulics*, Modelling of Coastal and Estuarine Processes, F.J. Seabra e A. Temperville (Eds.), Coimbra, 1994, pp. 59-70.

[25] O.S. HIDALGO, J.C. NIETO, C. CUNHA and C. GUEDES SOARES, "Filling Missing Observations in Time Series of Significant Wave Height", *Proceedings of the 14th International Conference on Offshore Mechanics and Artic Engineering*, C. Guedes Soares et al (Eds), l995, Vol. II, pp. 9-17.

[26] G.A. ATHANASSOULIS and C.N. STEFANAKOS, "A Non-Stationary Stochastic Model for Long-Term Time Series of Significant Wave Height", J. Geophysical Research, 1995, Vol. 100, pp. 16149-16162.

[27] C. GUEDES SOARES and A.C. HENRIQUES, "On The Statistical Uncertainty in Long Term Predictions of Significant Wave Height" *Proceedings of the 12th Offshore Mechanics and Artic Engineering Conference*, C. Guedes Soares et al (Eds.), 1994, Vol. II, pp. 65-75.

[28] C. GUEDES SOARES and J.A. FERREIRA,. "Modelling Long-term Distributions of Significant Wave Height", *Proceedings of the l4th International Conference on Offshore Mechanics and Artic Engineering*, C. Guedes Soares (Ed.), 1995, Vol. II, pp. 51-61

[29] S. HAVER, "Wave Climate off Northern Norway", *Applied Ocean Research*, 1985, Vol. 7, pp. 85-92.

[30] M.K. OCHI, "New Approach for Estimating the Severest Sea State from Statistical *Data", Proceedings Coastal Engineering Conference*, ASCE, 1992, pp. 512--525.

[31] J.A. FERREIRA and C. GUEDES SOARES "Estimation of the Occurrence of Severe Sea States with Beta Distributions" *WAVEMOD Report Tec. 3.3-03(1)*, Mast Contract n.° CT92/0025, 1995.

[32] G.A. ATHANASSOULIS, E.K. SKARSOULIS and K.A. BELISBASSAKIS, "Bivariate Distributions with Given Marginals with an Application to Wave Climate Description", *Applied Ocean Engineering*, Vol. 16, 1994, pp. 1-17

[33] J.A. FERREIRA, and C. GUEDES SOARES, "Modelling Long-term Bivariate Distributions of Significant Wave Height and Mean Wave Period", *WAVEMOD Report Tec. 2.4-01(0)*, Mast Contract n.° CT92/0025, 1995.

ION SELECTIVE MICROELECTRODES IN EXPERIMENTAL PHYSIOLOGY

J.A.G.C. Sequeira * and C.A.C. Sequeira **

* Instituto de Biofísica e Engenharia Biomédica ** Instituto Superior Técnico

Original submetido em 2 de Novembro de 1995

ABSTRACT

It is hard to pick up a technical journal today that does not include some information on new electrochemical sensors. And even in the popular literature we have seen articles on topics such as chemically sensitive field effect transistors (CHEMFETs) for in vivo monitoring. The present article includes a general description of ion selective microelectrodes (ISMs), being the first of a series of papers on advanced chemical devices for clinical applications.

1. INTRODUCTION

The importance of extracellular and intracellular recording with ion selective microelectrodes (ISMs) is growing rapidly in several areas of experimental physiology [1-4]. These are particularly useful in renal, gastrointestinal, and cardiac electrophysiology, as well as in studies of the microcirculation, and of membrane transport in a variety of cell types. Today the term "microelectrode" implies electrodes with tip diameters that do not exceed 1-2 μm, and very often tip diameters are even smaller than 1 μm. Our particular interest in ion selective microelectrodes arose because of our desire to make measurements of very small ion concentrations of chemical species with relevance in clinical chemistry. ISMs have been combined with ion selective field effect transistors (ISFETs), and constitute a first step to the development of more advanced devices for continuous in-vivo monitoring of certain electrolyte species.

2. KINDS OF ELECTRODES

There are three kinds of microelectrodes that have been used so far in biological studies and these are solid state, glass membrane, and liquid membrane microelectrodes. At present, the latter type is the most widely used. Liquid membranes can be based on ion-exchangers [5, 6] or on neutral carriers [7-10].

Figure 1 illustrates a liquid membrane ISM. It is composed of a glass microelectrode, the tip of which is filled by an ion selective liquid membrane. The contact to the back of the liquid membrane is achieved by means of a filling solution which contains the ion for which the membrane is selective, as well as a species which defines the potential of the internal contact with respect to the filling solution. Generally, the internal contact is achieved by means of an AgCl-coated Ag wire, the potential of which is determined by the presence of Cl^- ions in the filling solution.

Ion selective liquid membranes are hydrophobic organic liquids; on the other hand, a clean glass surface is hydrophilic, which means that the liquid membrane will be displaced from the microelectrode tip by water if the glass surface is not treated to become hydrophobic [11]. The major component of glass being silicon dioxide, the oxygen atoms at the surface can be present

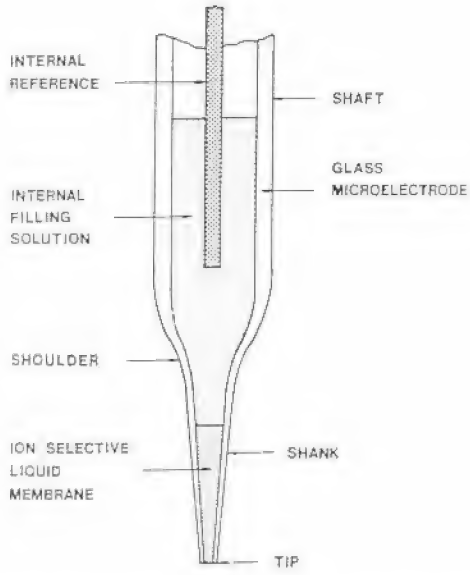


Fig. 1. Schematic representation of a liquid membrane ion selective microelectrode.

in one of two forms as shown in Figure 2. Siloxane oxygens are bonded to two silicon atoms while a silanol oxygen is bound to only one silicon atom. The proton of the silanol can dissociate and leave a negatively charged oxygen on the surface. These negative sites can then interact with cations contained in the solution with which the glass is in contact and the glass surface can behave as a cation electrode. It is therefore important to mask as many of the silanol groups as possible in order to optimize electrode function. This is done by means of a silanization treatment which can be conducted either in liquid or vapour phase. Figure 2 shows an ideal situation in which the silanol groups are inactivated by reacting with trimethylchlorosilane.

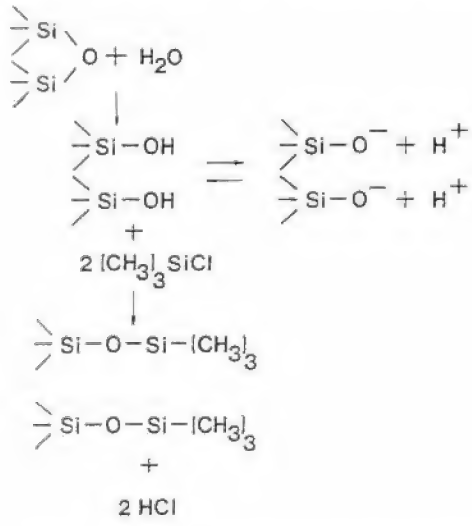


Fig. 2. Conversion of a siloxane group to two silanol groups by hydration, and reaction of the silanol groups with trimethylchlorosilane.

3. MEASURING CELLS

A typical measuring cell is shown in Figure 3. By selectively transferring the

ion to be

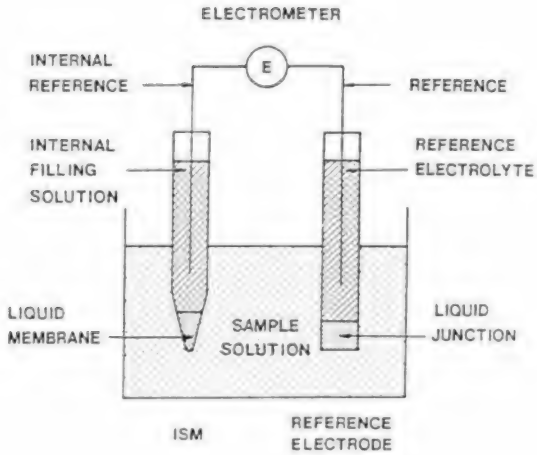


Fig. 3. Schematic diagram of ion selective microelectrode measuring circuit and cell assembly.

measured from the sample solution to the liquid membrane phase, a potential difference is generated between the internal filling solution and the sample solution [12]. Ideally, the potential E of the cell is given by the Nernst equation:

$$E = E_0 + s \log a_i \tag{1}$$

However, because of the presence of interfering ions, the potential of the cell is described by the successful semi-empirical relationship developed by Nicolsky and Eisenman [13, 14]:

$$E = E_0 + s \log \left[a_i + \sum_j K_{ij}^{Pot} \left(a_j\right)^{z_i/z_j} \right] \tag{2}$$

with

$$s = \frac{2.303\ RT}{z_i\ F} = \frac{59.16\ mV}{z_i}\ (\text{at } 25°\ C) \tag{3}$$

and

$$E_0 = E_0' + E_R + E_D \tag{4}$$

where

E = potential of the cell

E_0' = constant potential difference including the boundary potential difference between the internal filling solution and the membrane.

E_R = constant potential difference consisting of the potential difference between the metallic lead of the inner reference electrode of the ISE and its internal filling solution, and of the potential difference between the reference electrolyte and the metallic lead of the reference electrode. E_R is independent of changes in sample composition.

E_D = liquid junction potential difference generated between reference electrolyte and sample solution. E_D is variable and sample solution dependent.

z_i, a_i = charge number and sample solution activity of the primary ion i.

z_j, a_j = charge number and sample solution activity of the interfering ion j.

TECNICA, n. 1 JAN 96

K_{ij}^{Pot} = potentiometric selectivity coefficient; K_{ij}^{Pot} is a measure of the preference by the sensor of the interfering ion j relative to the primary ion i.

R = molar gas constant.

T = absolute temperature.

F = Faraday constant.

4. ELECTRICAL NOISE

The high resistivity of ion selective liquid membranes combined with the very small tip diameter of ISMs results in high electrical resistance of these devices $(10^9\ \Omega - 10^{12}\ \Omega)$ [1, 5, 7, 10]. This can cause difficulties with electrical noise.

Even if it is not generated by the system, electrical noise can be present due to capacitive, inductive, and electromagnetic coupling of the system with an external noise source [15]. In the case of an ISM, the most bothersome source of noise is due to motion of an operator around the physiological preparation; in this case, the noise is due to capacitive coupling with the voltage due to charge build-up on the operator's body. Figure 4a shows the situation schematically. The reference electrode is grounded, and the ISM is connected to an electrometer by means of a wire; C_G represents the stray capacitance between the wire and ground and C_C represents the

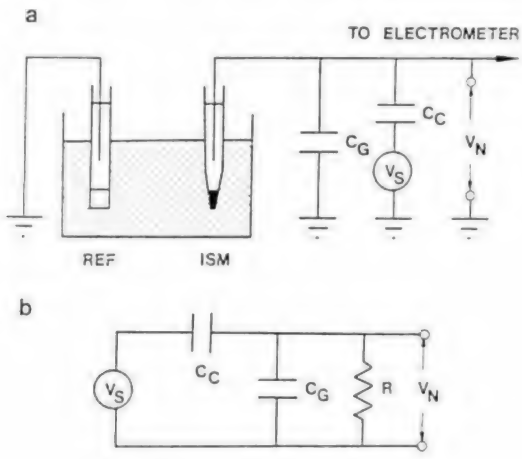


Fig. 4. a) Capacitive coupling of noise source to ISM.
b) Equivalent electrical circuit.

coupling capacitance between the ISM-wire assembly and the noise source V_S; V_N is the noise voltage developed across the ISM. Assuming there is no capacitive coupling with the reference electrode, the impedance of the reference electrode is negligible compared to that of the ISM, and the ISM is purely resistive, the electrical equivalent circuit for the arrangement is the one shown in Figure 4b. Considering this circuit, the amplitude V_N of the noise voltage produced across the ISM is given by:

$$V_N = \frac{\omega R C_C}{1 + \omega^2 \left[(C_C + C_G)^2 R^2 \right]^{1/2}} V_S \qquad (5)$$

This equation does not show explicitly how the noise voltage depends on the various parameters, however, two limiting cases can be considered. First, we consider the case when R is much lower than the impedance of $C_C + C_G$:

$$R << \frac{1}{\omega (C_C + C_G)}$$

In this case, Equation (5) reduces to:

$$V_N = \omega R C_C V_S \tag{6}$$

This clearly shows that, in this case, V_N is proportional to the angular frequency ω, the resistor R, the coupling capacitor C_C, and the amplitude of the disturbing voltage V_S. A second limiting case is expressed by:

$$R >> \frac{1}{\omega (C_C + C_G)}$$

In that case, Equation (5) becomes:

$$V_N = \frac{C_C}{C_C + C_G} V_S \tag{7}$$

This is, of course, the limiting case for high frequencies. A plot of the noise voltage V_N as a function of the angular frequency ω is given in Figure 5.

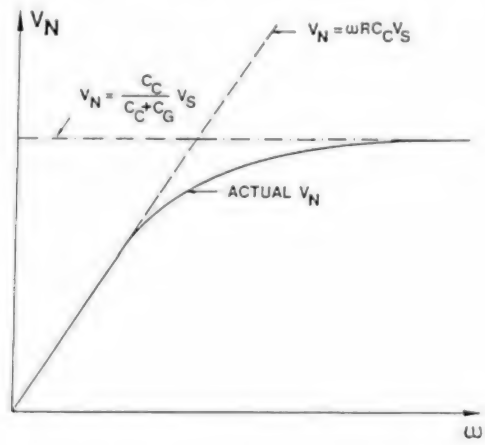


Fig. 5. Frequency response of capacitively coupled noise voltage.

Since in the case of microelectrodes, one has no control on the noise sources and their characteristics, or on the magnitude of the resistance R, the only options available for the reduction of the noise voltage V_N are shielding or reduction of the length of the connecting leads, which will result in reduction of the coupling capacitor C_C. The latter can be achieved by directly mounting the ISM tip on top of the gate of an ISFET as it would be discussed in a future publication.

5. FINAL REMARKS

Intracellular ISMs using ion selective liquid membranes have a very high resistance because of their very small tip diameter (0.5-1.0 μm). The value

of the resistance ranges from $10^{9}\Omega$ to $10^{12}\Omega$ [1], depending on the tip size and the type of ion selective liquid membrane. This imposes the requirement of a very high input impedance and a very small input current on the measuring electrometer. Any shunt capacitance across the ISM such as shielding of the connecting lead will increase the response time of the probe. On the other hand, shielding is necessary in order to reduce the influence of electrostatic and electromagnetic noise. It is generally most desirable to bring the electrometer as close as possible to the microelectrode. One possibility is a microprobe electrometer in which the preamplifier is actually part of the ISM's holder. A further step is to place the microtip directly on the gate of an ISFET acting as the amplifier, leading to the micro ion selective field effect transistor (MISFET). Using appropriate liquid ion exchangers (LIEs), MISFETs can be developed and characterized in terms of sensitivity, selectivity, limit of detection, electrical response time and chemical response time. In order to measure chemical response time, special purpose flow injection analysis (FIA) systems can be envisaged. Transfer function measurements can also be conducted on MISFETs and interpreted in terms of the impedance of the microelectrode placed on their gate. Most of these studies are being of our concern for some time. This short paper provides basic information about the ion selective microelectrode, as a pioneer concept in this broad domain of chemically sensitive solid state devices for medical and biological chemistry.

REFERENCES

1. Thomas, R.C., "Ion-sensitive Intracellular Microelectrodes, How to Make and Use Them"; Academic Press: New York, 1978.
2. Brown, H.M.; Owen, J.D., Ion-Selective Electrode Rev. 1979, 1, 145.
3. Armstrong, W. McD.; Garcia-Diaz, J.F., Fed. Proc. 1980, 39, 2851.
4. Armstrong, W. McD., in "Epithelial Ion and Water Transport"; Macknight, A.D.C.; Leader, J.P., Eds.; Raven Press: New York, 1981.
5. Walker, J.L., Anal. Chem. 1971, 43, 89A.
6. Tsien, R.Y., Trends in Neurosci. 1980, 3, 219.
7. Steiner, R.A.; Oehme, M.; Ammann, D.; Simon, W., Anal. Chem. 1979, 51, 351.
8. Lanter, F.; Steiner, R.A.; Ammann, D.; Simon, W., Anal. Chim. Acta 1982, 135, 51.
9. Erne, D.; Ammann, D.; Simon, W., Chimia 1979, 33, 88.
10. Ammann, D.; Lanter, F.; Steiner, R.A.; Schulthess, P.; Shijo, Y.; Simon, W., Anal. Chem. 1981, 53, 2267.
11. Walker, J.L., In "Medical and Biological Applications of Electrochemical Devices"; Koryta, J., Ed.; John Wiley and Sons: New York, 1980.
12. Meier, P.C.; Ammann, D.; Morf, W.E.; Simon, W., In "Medical and Biological Applications of Electrochemical Devices"; Koryta, J., Ed.; John Wiley and Sons: New York, 1980.
13. Durst, R.A., "Ion-Selective Electrodes"; Nat. Bur. Stand. Spec. Publ. 1969, No. 314.
14. Eisenman, G., "Glass Electrodes for Hydrogen and Other Cations"; Marcel Dekker: New York, 1967.
15. Ott, H.W., "Noise Reduction Techniques in Electronic Systems"; John Wiley and Sons: New York, 1976.

A MORFOLOGIA DA CIDADE DE LISBOA: DA ÉPOCA MEDIEVAL À CIDADE ACTUAL

Mário Krüger, Teresa Valsassina Heitor e Ana Tostões
Departamento de Engenharia Civil
Original submetido em 2 de Novembro de 1995

RESUMO

Este artigo propõe descrever a evolução morfológica da cidade de Lisboa desde a época medieval até à actualidade. O objectivo é compreender o desenvolvimento global da cidade sob o ponto de vista da sua organização espacial relacionando-o com as transformações ocorridas ao longo da sua história, detectando as situações de continuidade e ruptura ocorridas no seu tecido urbano e desenhadas no tempo. A abordagem seguida baseia-se na descrição morfológica dos factos urbanos e utiliza como metodologia a teoria de Space Syntax (Hillier e Hanson, 1984).

1. INTRODUÇÃO

Este artigo tem por finalidade descrever a evolução morfológica da cidade de Lisboa desde a época medieval até à actualidade. O principal objectivo é entender o desenvolvimento global da cidade sob o ponto de vista da sua organização espacial relacionando-o com as transformações ocorridas ao longo da sua história. Pretende-se detectar as situações de continuidade e ruptura ocorridas no seu tecido urbano e desenhadas no tempo. A descrição morfológica dos factos urbanos utiliza como metodologia a teoria de Space Syntax (Hillier e Hanson, 1984).

O estudo é iniciado com a descrição da cidade medieval. Este primeiro momento de análise baseia-se em elementos fornecidos pelo mapa de J.N.Tinoco (1650), considerada a fonte cartográfica mais antiga e fidedigna da cidade de Lisboa. Este mapa evidencia a relação da cidade – compreendida entre o Bairro Alto e o Campo de Sta. Clara – com a zona ribeirinha revelando ainda o tempo dos descobrimentos portugueses. Segue-se a análise do novo traçado da cidade Pombalina (terceiro quartel do Séc.XVIII) que introduz uma ruptura morfológica: a cidade volta 'as costas para o rio' e promove a ligação entre as partes oriental e a ocidental, mantendo no entanto algumas permanências – Rossio, Praça do Comércio, Castelo, Alfama e Bairro Alto. A rectificação do traçado configura uma nova cidade que cada vez se afastará mais do rio, sua anterior principal razão de ser, passando-se da Lisboa do apogeu das Descobertas para a Lisboa que contém o germe da futura metrópole. Após a intervenção pombalina, a manutenção do sentido dos traçados urbanos confirma a interiorização de Lisboa pelo desenvolvimento de linhas de fixação ao longo de dois vales: do VALVERDE (Avenida de Liberdade – Avenida da República) e do vale dos Anjos (Avenida Almirante Reis – Avenida Gago Coutinho). Este desenvolvimento esboça-se na Lisboa Romântica estruturando-se com o traçado da Lisboa de Ressano Garcia para posteriormente se configurar na Lisboa do Estado Novo antecessora da Lisboa actual.

2. MÉTODO DE ANÁLISE

A abordagem utilizada neste trabalho consiste numa aproximação racional à descrição do espaço, entendido como entidade morfológica fundamental no campo da arquitectura e do desenho urbano, inicialmente desenvolvida por Hillier e Hanson (1984). Traduz-se num conjunto de técnicas descritivas – representação, quantificação e interpretação – da estrutura configuracional de sistemas espaciais.

A estrutura configuracional é o resultado das relações estabelecidas entre os espaços de um sistema tendo em atenção todos os outros que o constituem ou mais precisamente, como os espaços se articulam e relacionam entre si enquanto elementos de um conjunto mais lato. O sistema espacial constitui uma estrutura de natureza contínua definida pela articulação entre os elementos construídos e pelas relações de permeabilidade e visibilidade estabelecidas.

Este sistema é representado gráficamente pelo mapa axial – transformação bidimensional feita a partir da planta – constituída pelo menor conjunto das maiores linhas que cobrem todo o sistema espacial e que correspondem à imagem de continuidade física e visual experimentada por aqueles que se movem ou permanecem estáticos no sistema. O mapa axial permite retirar informação alfanumérica de modo a quantificar as propriedades sintácticas da configuração em função dos níveis de acessibilidade presentes. Para cada linha axial são atribuídos valores numéricos que expressam a sua importância em relação às linhas vizinhas e a complexidade dos percursos a partir de cada linha em relação às restantes. Para tal, o mapa axial é transformado num grafo – o grafo axial. As linhas no mapa axial correspondem aos vértices desse grafo sendo que dois vértices são adjacentes se e só se as linhas correspondentes se intersectarem. O grafo axial contém informação acerca das conexões de cada linha com todas as outras que constituem o sistema. O conceito de acessibilidade é entendido não em termos de distância métrica mas em função do número de mudanças de direcção – profundidade do grafo – que é necessário efectuar para ir de um espaço a outro no sistema.

A medida sintáctica de maior relevância é a *Integração* porque define o grau de acessibilidade de cada linha axial em relação a toda a área de estudo ou, por outras palavras, porque define o modo como o sistema de percursos a partir de uma linha em relação às restantes é, relativamente, simples (integrador) ou tortuoso (segregador). O grau de integração ou segregação que uma linha axial (espaço) apresenta em relação às restantes linhas do sistema está dependente do número de mudanças de direcção necessárias, ou seja da profundidade da linha. Estes valores são medidos através da Assimetria Relativa (RA). Esta medida exprime a relativa profundidade do espaço a todos os outros do sistema. O valor de RA para a linha axial i é calculado pela seguinte expressão:

$$RA_i = 2(DM_i-1)/(K-2)$$

em que:

DM_i = a distância média da linha axial i em relação às restantes linhas do sistema,

K = número total de linhas axiais presentes no sistema.

Os valores de RA variam entre 0 e 1. Os valores mais baixos indicam que o espaço tende a integrar o sistema enquanto que a valores mais elevados correspondem a linhas axiais ou a espaços urbanos com tendência a serem segregados pelo sistema.

A Assimetria Relativa é uma função do número de total K de espaços ou linhas axias presentes num sistema. Para efeitos comparativos entre mapas axiais de diferentes dimensões, os valores de RA são padronizados pela Assimetria Relativa da raíz de um grafo em forma de diamante com igual número K de espaços. Ao inverso desta medida dá-se o nome de *Integração*. Hillier e Hanson (1984) tabelam RA da raíz desta forma em diamante em função do número K de espaços e Kruger (1990) apresenta a expressão matemática que traduz numéricamente estes valores. Como veremos os

valores da integração média das linhas axiais dos mapas em análise são função do número K de espaços pelo que, para atenuar de forma significativa este efeito, descreveremos a variação da integração pelo seu coeficiente de variação dado pela razão entre o desvio padrão e a média da integração de cada mapa axial.

A *Integração* define uma propriedade global do sistema. O modo como os espaços se relacionam com os outros imediatamente adjacentes é expresso através de medidas locais: conectividade, controle e raio 3. A *conectividade* exprime o grau de conecção de um espaço em relação aos espaços vizinhos i.e., indica o número de espaços ou linhas axiais imediatamente adjacentes. O *controle* traduz a quantidade proporcional de acessos que um espaço apresenta em relação aos espaços adjacentes i.e. indica o grau de importância que um espaço assume em relação aos espaços vizinhos enquanto ponto obrigatório de passagem. Os valores mais altos correspondem aos espaços com maior controle nas relações locais. Os valores mais baixos correspondem a espaços com um fraco controle local. O *raio 3* mede a integração local dos espaços i.e. o número de linhas e mudanças de direcção que são necessárias para ir de um espaço a todos os outros que se encontram a uma profundidade igual ou menor que 3. O seu valor é calculado através de fórmula idêntica ao valor da integração mas sómente são consideradas distâncias iguais ou inferiores a três unidades.

Se considerarmos que A_{ij} representa a matriz de adjacência do grafo axial em que $A_{ij} = 1$ se o vértice i for adjacente ao j e, caso contrário, $A_{ij} = 0$ então a *Conectividade* C^1_i da linha axial i será dada pela seguinte expressão:

$$C^1_i = \Sigma_j A_{ij}$$

e o Controle C^2_i da mesma linha i sobre as restantes será dado por:

$$C^2_i = \Sigma_j (A_{ij} / \Sigma_i A_{ij})$$

A correlação estatística entre a medida global e a local estima a *inteligibilidade sintáctica* do sistema. Esta medida relaciona o grau de conexões de uma linha – propriedade local – com a posição que esta assume na globalidade do sistema – propriedade global. A inteligibilidade sintáctica expressa o modo como o sistema espacial em questão pode ser reconhecido no seu todo através da leitura das suas partes constituintes.

A compreensão da estrutura sintáctica e respectivos padrões espacias presentes numa configuração é facilitada pela leitura dos *cascos* obtidos em função de cada propriedade. O casco é a amostra constituida pelos 5%, 10% ou 20% (dependente da dimensão do sistema) espaços ou linhas axiais que obtiveram maior valor, numerados por ordem decrescente.

3. BREVE ENQUADRAMENTO HISTÓRICO

A fim de enquadrar históricamente a evolução urbana de Lisboa descreve-se, brevemente, a expansão e a relação com o rio contrapondo-se a cidade ribeirinha à cidade do interior.

Nos finais do século XV e sobretudo no início de Quinhentos, tempo que corresponde afinal ao período de expansão além-mar, Lisboa cresce consideravelmente para abrigar os novos habitantes que os negócios, a construção naval, a "carreira da Índia"(Moita 1983) atraíam. Os 60 mil habitantes do século XV passam a 80 mil no século seguinte para chegarem a atingir os 150 mil em seiscentos (Vieira da Silva cit. por França 1987), números reveladores de um acréscimo considerável de dinâmica urbana.

As estruturas medievais são abandonadas. O rei já não se abriga atrás de inúteis muralhas. Constrói um novo palácio real da Ribeira ao lado dos estaleiros navais, junto ao rio, determinando o futuro desenvolvimento da cidade que definitivamente encontrava no mar a sua razão de existir. É precisamente a alteração das funções da cidade e a localização das novas actividades que vão reger as transformações urbanas (Marques, 1994). Desenvolvimento ribeirinho e crescimento para o interior vão definir os parâmetros do desenvolvimento de Lisboa.

O lugar de Lisboa nasce da relação terra-rio/mar. A enorme bacia que o Tejo forma frente á cidade é o elo desta ligação e permitiu ao português de quinhentos o usofruto do melhor porto da época. Já em meados de quatrocentos quando o centro urbano e político continuava no castelo, o foco comercial já se desviara em relação á baixa e eram abertas portas na muralha para a comunicação com o Tejo. Mas é com D.Manuel I que são feitas as grandes obras de aterros na Ribeira, incluindo a criação do Terreiro do Paço, que definitivamente, marcará a cidade como uma presença determinante no seu desenho – retomado na cidade pombalina – e junto ao qual será erguido o novo Paço Real para onde o se transfere em 1505, consagrando o terreiro do paço como centro político e administrativo. A cidade medieval deu lugar a uma cidade moderna e comercial, aberta ao rio, ao Atlântico.

A estreita relação com o rio vai manter-se até que os planos delineados no pós terremoto, quer para a nova Baixa de traçado iluminista que se ergue sobre os escombros da velha cidade, como para os estudos utópicos de expansão para o interior de Lisboa (Moita 1982, p.87), anunciem claramente a intenção dos arquitectos Pombalinos da inevitabilidade do crescimento norte da cidade.

Desenhado no remate da rigidez do traçado da Baixa, logo após a nova Praça do Rossio, o Passeio Público, para além de constituir um inédito programa de equipamento verde acrescentado à nova cidade iluminista, situava-se cronológica e topograficamente como um novo jardim localizado na continuação da cidade pombalina, apontando conscientemente no sentido do desenvolvimento urbano (França, 1987, p.138).

Com efeito, quando em 1879 é aberta a Avenida da Liberdade sobre o Passeio Público, o *boulevard* rasgado para norte, cuja ideia fora lançada em 1859, apenas retoma uma intenção dos arquitectos pombalinos que, sem porem em causa o corpo ribeirinho da cidade intuiram a funcionalidade de um eixo ortogonal cortando o Valverde e Vale Pereiro em direcção à circunvalação (Henriques da Silva 1989, p.21), finalmente definida em 1885.

A Avenida da Liberdade transforma-se na "Avenida" duma cidade assim libertada da sua configuração tradicional, que a reconstrução pombalina ainda adoptara, definindo-se como eixo de penetração da cidade que se construía ao longo do século XX, iniciada a partir dos bairros Camões e Barata Salgueiro que a ladeavam, prolongada pelas avenidas Novas até ao Campo Grande. Paralelamente um eixo mais pequeno-burguês o da Rainha Dona Amélia depois Almirante Reis, prolongava a rua da Palma, segundo eixo de penetração ao longo de um vale que a cidade do estado Novo, a partir de finais dos anos 20, completaria e condensaria numa estrutura mais vasta, consagrada no Plano Director de De Groer (1938-1948). A Cidade do Estado Novo desenvolve-se para Alvalade consagrando definitivamente a expansão a oriente, para Belém-Restelo estruturando a zona oriental e pontuando a cidade com importantes equipamentos (IST-Alameda, Monsanto, Aeroporto...)

Por isso, alguns autores consideram que Lisboa, de cidade organizada inicialmente em função do rio, enceta a partir do 3.º quartel do século XIX uma nova expansão, desta vez em direcção ao planalto, com uma estrutura radio-

cêntrica ramificada a que corresponde num primeiro momento a construção da Avenida da Liberdade seguida das Avenidas Novas, e num segundo momento, considerado do Estado Novo, fechando a expansão oriental e ocidental (Nunes da Silva 1987, p.48) como que definitivamente marcando o território urbano da futura metrópole, isto é, o centro da área metropolitana de Lisboa esboçada ao longo da cidade dos anos 60 até à actualidade.

4. DESCRIÇÃO DOS MAPAS UTILIZADOS NA ANÁLISE

As fontes cartográficas utilizadas obedecem a dois critérios de selecção: fidedignidade e representatividade balizando-se os momentos mais importantes da evolução da cidade.

A Planta Topográfica de Lisboa em 1650 por José Luís Tinoco (Fig. 1) é a primeira planta da cidade que, apesar de levantada em seiscentos, apre-

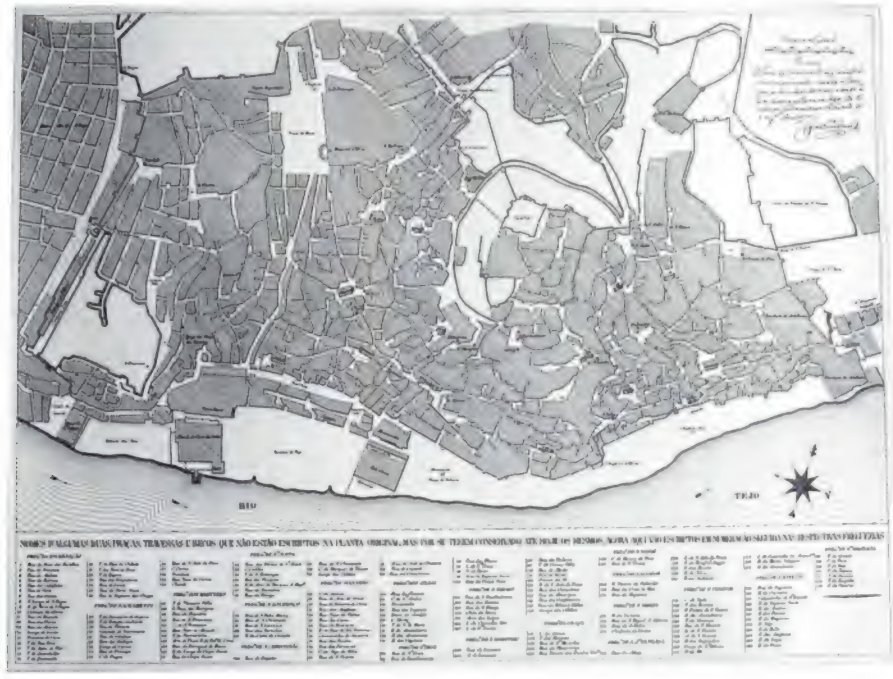


Fig. 1 Planta de Tinoco
Planta topográfica de Lisboa em 1650 por João Nunes Tinoco

senta a estrutura medieval. Inclui a ocupação ribeirinha, mostrando a transformação e ocupação das muralhas nesta zona. É limitada a ocidente por um troço do Bairro Alto e a oriente pela Graça (Cerca dos Frades de S.Vicente, Campo de St.ª Clara, St.ª Engrácia) e pela fundição de Artilharia junto ao rio. Permite reconhecer a Cerca Moura e a Cerca Fernandina (assinaladas a vermelho), a localização das diversas ruas por freguesias e dos equipamentos principais. É clara a presença do Rosssio e do Terreiro do Paço e a sua forte ligação através da estrutura urbana orgânica caracterizada por um emaranhado de ruas medievais, acentuando o contraste entre Alfama, Mouraria, mesmo a Baixa, com o loteamento quinhentista, reticulado e fora de muralhas, do Bairro Alto.

A Planta Pombalina (Fig. 2) reproduz a cidade do pós-terremoto, colorida, assinalando com banho de vermelho o que se conserva antigo e amarelo o "Projecto do novo Plano" delineado pelos engenheiros militares. À cidade barroca de D. João V, com o aqueduto abastecedor, sobrepõe-se a nova cidade "iluminista". Os limites urbanos alargam-se: a ocidente até Alcântara,

a oriente às Comendadeiras de Santos, a norte desenha-se a penetração planeada do Passeio Público (primeiro equipamento verde público) acompanhada pela rua de S.José delineada até S. Sebastião, constituindo uma das saídas norte da cidade tal como o regueirão dos Anjos. O desenho da

Fig. 2 Planta Pombalina
Planta topográfica da cidade de Lisboa na segunda metade do século XVII

cidade é alterado com o traçado iluminado da Baixa levantada sobre os escombros do terremoto, usando-se uma malha reticulada que se adapta a outras intervenções pombalinas como o Bairro da Fábrica das Sedas às Amoreiras ou o conjunto da Lapa. A sul a margem ribeirinha é ampliada com o monumental prolongamento do T. Paço, a nova Praça do Comércio, que mantém uma forte ligação ao Rossio.

A Planta Romântica (Fig. 3) representa uma planta com vista de Lisboa em 1833 de origem inglesa. Os limites da cidade mantêm-se, alargando-se ape-

Fig. 3 Planta Romântica
Planta e vista de Lisboa em 1844

nas a ocidente a ocupação em Alcântara e a oriente até Stª Apolónia. Os eixos de penetração norte clarificam-se, sobretudo rua do Salitre e a rua de S.José contornando o passeio Público, e a sul inicia-se o aterro da Boavista. Trata-se da consolidação do tecido delineado no tempo de Pombal e da definição de uma linha de defesa circundando a área urbana desde Alcântara a Santos, passando por Campo de Ourique, Picoas, Arco Cego, Alto de S. João.

A Planta de Ressano Garcia (Fig. 4) consiste na planta topográfica publicada em 1871 tendo sobrepostas as alterações feitas até 1911. Os limites

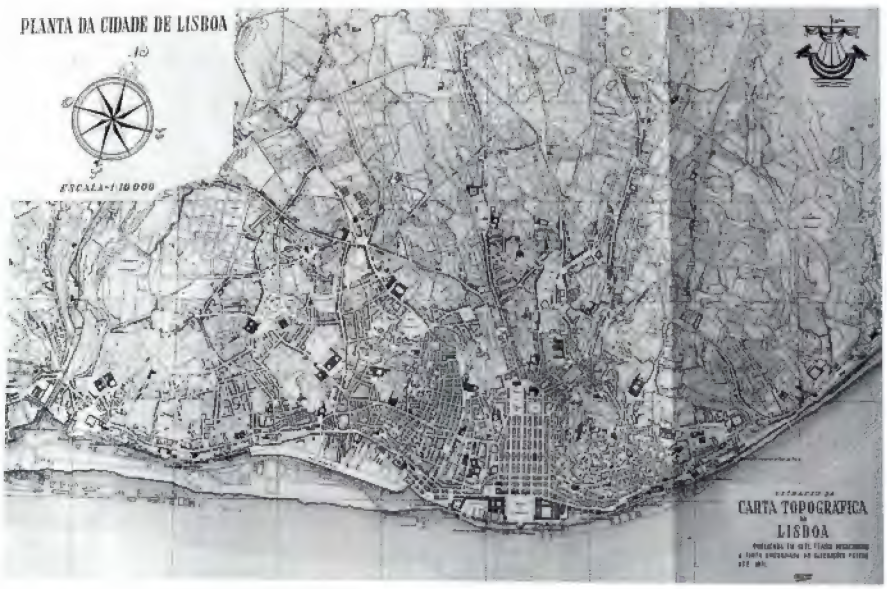


Fig. 4 Planta de Ressano Garcia
Planta topográfica de Lisboa publicada em 1871, tendo sobrepostas a tinta encarnada as alterações feitas até 1911.

mantêm-se em Alcântara e alargam-se até à Madre de Deus. A sul o aterro da Boavista e, perfeitamente definida a Estrada de Circunvalação articulada com a expansão norte da cidade desencadeada a partir da abertura da Avenida da Liberdade (sobre a destruição do Passeio Público). Definem-se os bairros Camões, Barata Salgueiro, o Parque da Liberdade e as Avenidas Novas que se estendem até ao Campo Grande. A ocidente, Campo de Ourique, o bairro ocidental ao Parque da Liberdade e a oriente a abertura da Rainha Dona Amélia, actual Av. Almirante Reis, no esteio do regueirão dos Anjos. Novos equipamentos pontuam a cidade (elevadores, eléctricos, gares, mercados, grandes armazéns) e a localização de industrias é acompanhada, por vezes, pela construção de vilas operárias.

A Planta do Estado Novo (Fig. 5) define-se com as alterações efectuadas até 1948 sobre os levantamentos de 1899-1904-1911. A área urbana corresponde exactamente à actual, isto é, dos Olivais a Algés. Inclui os aterros efectuados em Belém (1940) e as Gares Marítimas, os Bairros Económicos do Arco do Cego, Encarnação, Madre de Deus, Caselas, Salazar e ainda o início do Bairro de Alvalade (assinalando-se as infraestruturas viárias básicas). A Avenida Almirante Reis é concluída com a Avenida do Aeroporto (o novo equipamento no limite norte da cidade) passando pela Praça do Areeiro, urbanizando-se toda a área da Alameda definida pelo IST em articulação com as Avenidas Novas, assim se ligando à cidade esta nova zona oriental de expansão. A ocidente o plano do Restelo articula-se com o novo equipamento verde, o Parque de Monsanto. Paralelamente ocorrem intervenções mais pontuais que se situam em linhas axiais bem definidas: Avenida Oriental ao Parque, D. João V, Paiva Couceiro, etc., imprimindo à cidade

alguma disciplina urbana que se liga à abertura de grandes eixos viários articulados com as saídas da cidade por auto-estradas (Norte, Estoril e Sintra).

Fig. 5 Planta do Estado Novo
Organizada em 1899 assinala as transformações realizadas entre 1911 e 1948

A Planta Actual (Fig. 6) baseia-se num levantamento efectuado pelos Serviços Cartográficos do Exército. Os limites da área urbana permanecem inalterados relativamente à anterior. Inclui os bairros de promoção pública com Alvalade e Olivais concluídos, Chelas e Telheiras, e toda a expansão de carácter especulativo e desordenado ao longo dos eixos periféricos de Benfica, Luz, e Lumiar. Em termos de novos eixos viários assinala-se a 2.ª circular e a Ponte sobre o Tejo estabelecendo a ligação com o sul.

5. DESCRIÇÃO SUMÁRIA DAS MEDIDAS SINTÁCTICAS DOS MAPAS ANALISADOS

As dimensões morfológicas dos mapas axiais resultantes das transformações gráficas operadas nas bases topográficas representadas nos mapas referidos (Tinoco, Pombalino, Romântico, Ressano Garcia, Estado Novo e Actual) estão resumidamente descritas no Quadro I.

As variações nas dimensões dos mapas axiais – número de linhas e nas propriedades configuracionais do sistema são devidas fundamentalmente a dois factores: à dimensão da população das linhas axiais e às alterações ocorridas na morfologia do tecido da cidade. Como foi referido, a dimensão do território cartografado varia consideravelmente nos mapas analisados traduzindo a evolução e expansão urbana. Esta dinâmica é acompanhada por alterações morfológicas detectáveis através da estrutura sintáctica e dimensão da configuração. Assim, nas passagens entre os mapas ou plantas I, II e III observa-se um decréscimo no número de linhas que compõem os sistemas. Pelo contrário, nos mapas seguintes, dá-se um aumento substancial na dimensão do sistema, em particular no que se refere aos dois últimos momentos de análise. Os limites da área de estudo sofrem sucessivas ampliações até estabilizarem no momento descrito pelo mapa V. Nos mapas ou plantas I, II e III, as alterações ocorridas em função da reestruturação do tecido e rectificação de traçados traduzem um aumento na acessibilidade global. A integração média dos sistemas aumenta de .447 para .754. Nos momentos seguintes a acessibilidade global diminui em particular nos dois

Fig. 6 Planta Actual
Planta topográfica de Lisboa, levantada, desenhada e publicada pelo Instituto Geográfico do Exército, 1993

sistemas finais. Este facto relaciona-se com o aumento significativo na dimensão do sistema, resultado não só, da ampliação dos limites urbanos como do prenchimento de espaços no interior da malha. O padrão de acessibilidade local dos sistemas, obtido em função do valor do Raio 3, segue o padrão acima descrito. As propriedades locais dos sistemas, referenciadas aos valores da conectividade e controle, mostram um maior investimento ao nivel de relações locais entre os espaços nos sistemas I e III em que o coeficiente de correlação entre as medidas é respectivamente .815 e .801.

6. ANÁLISE DOS MAPAS AXIAIS PELAS MEDIDAS SINTÁCTICAS LOCAIS E GLOBAL

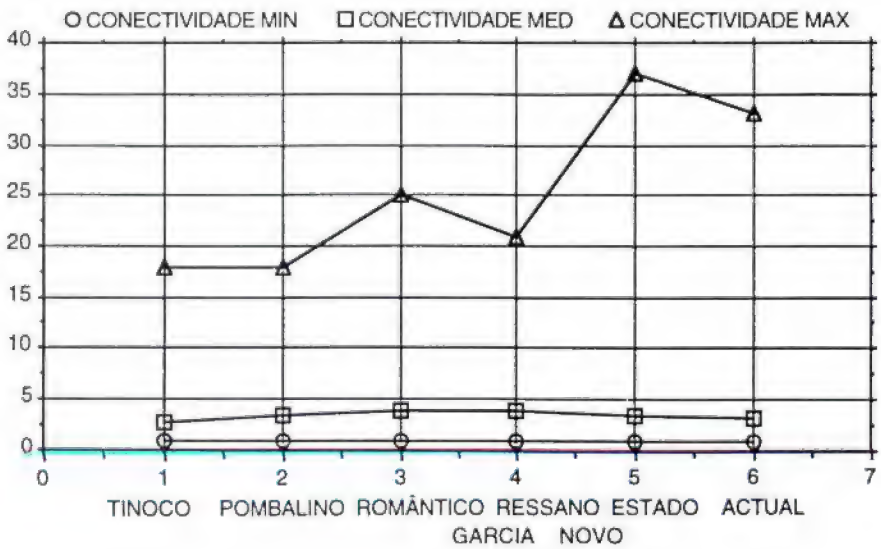
Com a finalidade de completarmos a análise elaborada anteriormente sobre os Mapas Axiais que descrevem, em seis momentos, a evolução morfoló-

	Planta I Tinoco	Planta II Pombalino	Planta III Romântico	Planta IV Ressano Garcia	Planta V Estado Novo	Planta VI Actual
n.º de linhas	1449	1285	1058	1878	4240	7331
INTEGRAÇÃO						
média	0.447	0.64	0.754	0.748	0.49	0.461
máx	0.663	1.018	1.137	1.21	0.791	0.742
min	0.269	0.286	0.367	0.269	0.267	0.227
RAIO 3						
média	1.631	2.021	2.248	2.184	1.963	1.875
máx	5.121	4.947	5.923	5.332	6.387	6.069
min	0.211	0.211	0.211	0.211	0.211	0.211
CONECTIVIDADE						
média	2.8	3.5	4	3.9	3.4	3.252
máx	18	18	25	21	37	33
min	1	1	1	1	1	1
CONTROLE						
média	1	1	1	1	1	1
máx	6.65	4.546	8.71	4.832	9.108	7.75
min	0.077	0.071	0.043	0.059	0.091	0.062
INTELIGIBILIDADE						
GLOBAL Int,Con	0.233	0.463	0.484	0.442	0.325	0.272
LOCAL-R3,Con	0.919	0.912	0.889	0.901	0.89	0.894
R3,Cnt	0.678	0.62	0.601	0.627	0.59	0.601
Con,Cnt	0.815	0.760	0.801	0.767	0.786	0.773

Quadro I – Valores médios, mínimos e máximos da Integração, Raio 3, Conectividade e Controle bem como da Inteligibilidade dos mapas de linhas axiais relativos às Plantas deTinoco, Pombalino, Romântico, Ressano Garcia, Estado Novo e Actual.

gica da cidade de Lisboa iremos analisar comparativamente o desempenho das medidas sintáticas locais – Conectividade, Controle e Raio 3 – bem como global – Integração – destes mapas.

Na Fig. 13 e no Quadro I podemos constatar a evolução dos valores médios, mínimos e máximos destas medidas para as linhas axiais de cada mapa.



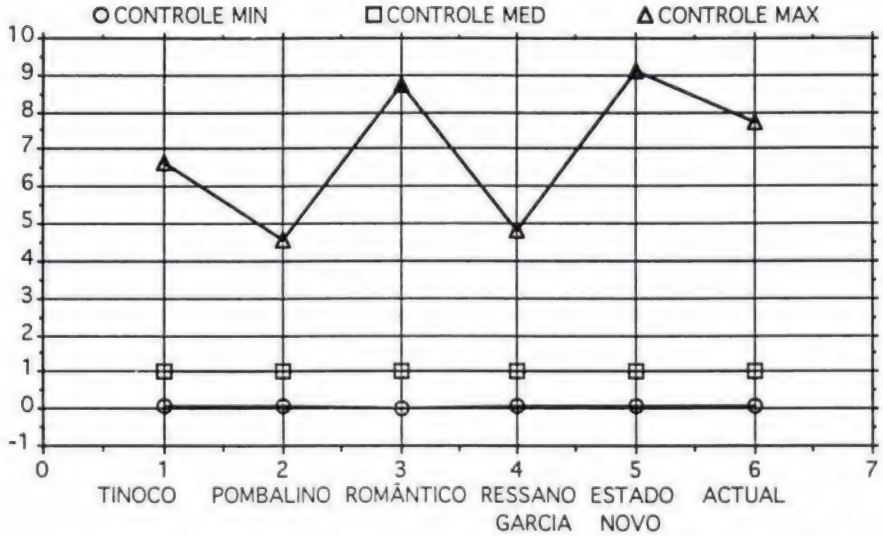


Fig. 13 Evolução dos valores médios, mínimos e máximos da Integração, Raio 3, Conectividade e Controle das linhas axiais dos mapas de Tinoco, Pombalino, Romântico, Ressano Garcia, Estado Novo e Actual.

Em relação às medidas locais podemos constatar uma evolução semelhante para os mapas analisados. Com efeito, a Conectividade, a medida mais local, apresenta valor máximo para o mapa do Estado Novo e menor para o mapa de Tinoco o que significa maior número de interseções para aquele e menor para este. Os valores médios da Conectividade e Raio 3 são menores para o mapa de Tinoco, aumentam progressivamente até ao período Romântico, diminuindo após a intervenção de Ressano Garcia sobre o tecido urbano de Lisboa.

Morfologicamente esta evolução caracteriza-se pela introdução generalisada da grelha como instrumento de desenho urbano na conformação da cidade que começa no Bairro Alto, já presente, ainda que parcialmente, no mapa de Tinoco. Esta grelha é plenamente assumida no mapa Pombalino e no Romântico apresentado-se, posteriormente, como um tipo de intervenção mais fragmentada e pontual como ocorre a partir do mapa de Ressano Garcia. O aumento e declínio destas medidas locais médias pode ser intrepertado também pelo aumento de escala métrica que ocorre a partir do mapa do Estado Novo que introduz grandes avenidas quando comparadas com as dos mapas anteriores.

Os valores máximos destas medidas também apresentam consistência evolutiva pois são menores para os mapas de Tinoco e Pombalino quando comparados com os do mapa do Estado Novo mostrando a importância local que assume a morfologia urbana neste último mapa. Os grandes eixos que conformam a cidade – Passeio Público, Avenidas da Liberdade, Almirante Reis e República – bem como o aparecimento de bairros morfologicamente homogéneos, como é o caso das Avenidas Novas, contribuem para esta situação.

É, no entanto, em relação à medida global – a Integração – que podemos notar maiores variações de comportamento em relação à caracterização morfológica destes mapas. Se reparmos na Fig. 13 podemos observar que os valores médios e máximos desta medida aumentam, progressivamente, desde o mapa de Tinoco até ao mapa de Ressano Garcia apresentado depois um acentuado declínio até ao mapa Actual.

Este resultados terão de ser cuidadosamente interpretados na medida em que a Integração é função da distância axial – ou de mudança de direcção da orientação dos percursos mínimos – de todas as linhas axiais em relação

às restantes. Por outras palavras, a Integração é uma função da dimensão do sistema dado pelo número de linhas axiais presentes em cada um deles.

Com efeito, se repararmos na Fig. 14, onde se apresentam os resultados da regressão entre a Integração média de cada mapa axial com a respectiva

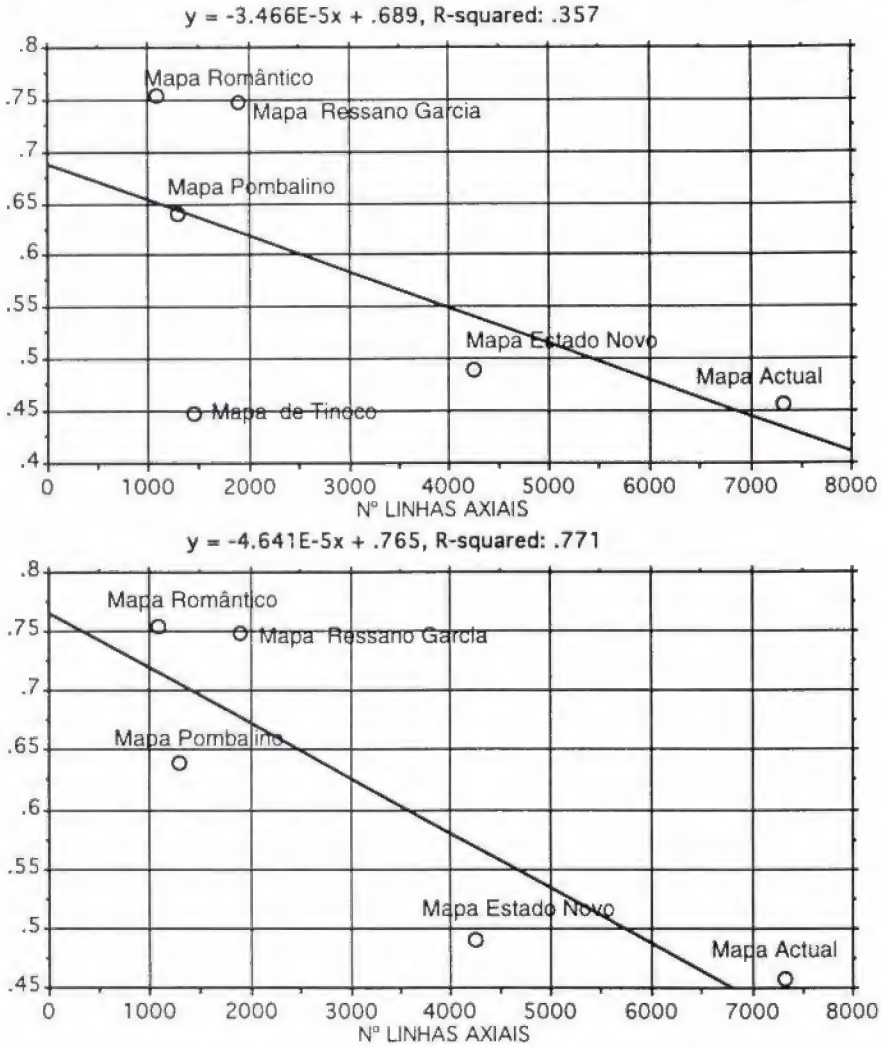


Fig. 14 Regressão da Integração média com o Nº de linhas axiais para os sistemas analisados com e sem o mapa de Tinoco.

dimensão, podemos constatar que o coeficiente de determinação é de 0,357 com 95% de confiância e que o mesmo cresce para 0,771 se lhe retirarmos a observação correspondente ao mapa axial que representa o mapa de Tinoco.

Estes resultados mostram que estamos, provavelmente, em face de um artefacto na medida em que a Integração é uma função da dimensão de cada sistema de linhas axiais analisado. No entanto, estes resultados chamam-nos também a atenção para a possível ocorrência de dois tipos morfológicos distintos de tecido urbano – o medieval com ruas estreitas e tortuosas com uma conformação quase labiríntica e a que resulta da intervenção Pombalina sob a forma de uma grelha reticulada que posteriormente é assumida como forma preponderante de desenho da cidade mesmo que este se manifeste com a configuração de grelha deformada pelas sucessivas "colagens, cozeduras e acrescentos" que podemos constatar na sua malha.

Estas considerações clarificam-se (ver Fig. 15) se fizermos uma regressão entre a Inteligibilidade de cada mapa axial com a respectiva dimensão. Pode-

mos, assim, constatar que, neste caso, passamos de um coeficiente de determinação de 0,303 para 0,948, respectivamente, com e sem o mapa de Tinoco.

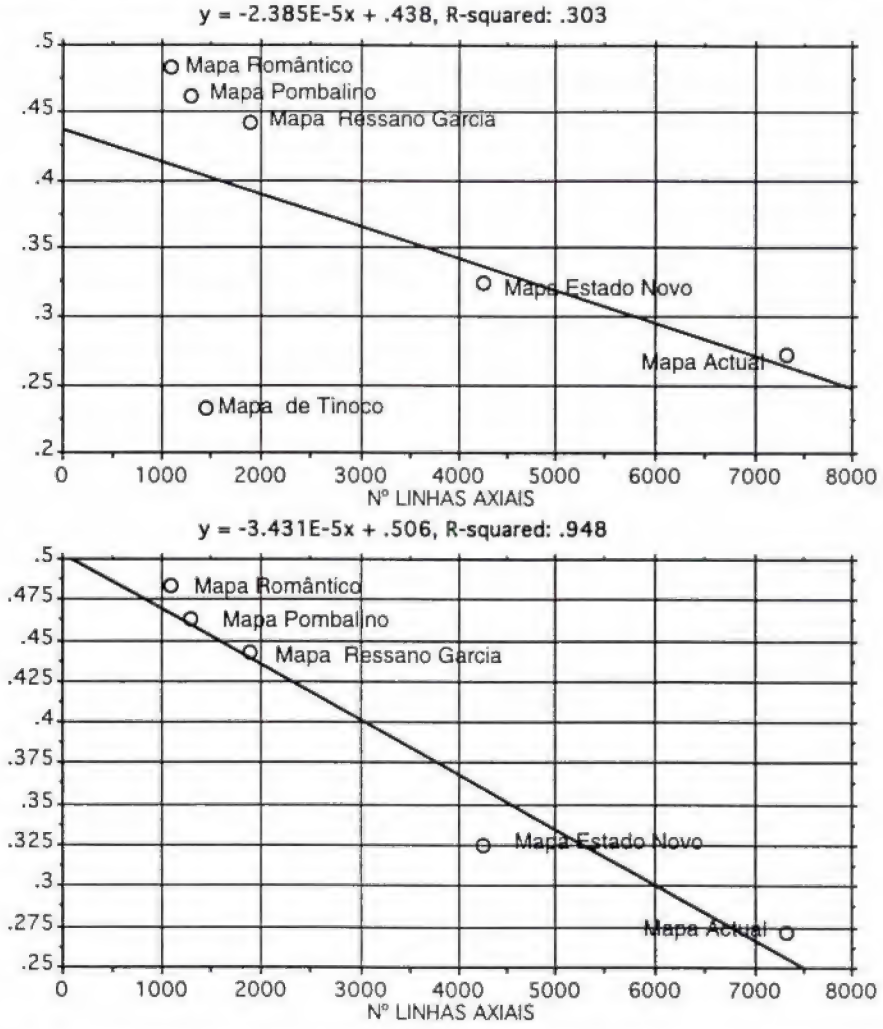


Fig. 15 Regressão da Inteligibilidade com o Nº de linhas axiais para ossistemas analisados com e sem o mapa de Tinoco.

Por outras palavras, se a Inteligibilidade dos sistemas espaciais diminui à medida que nos aproximamos da época actual isso, em grande parte, é devido ao aumento das dimensões de cada sistema ao longo do tempo restando, como hipótese a ser confirmada, se ocorrem ou não dois ou mais periodos morfológicos na evolução urbana da cidade de Lisboa que sejam dectáveis por aferição das suas propriedades sintáticas para além da sua dimensão.

A evolução do Coeficiente de Variação da Integração (ver Fig. 16) pode fornecer-nos uma pista na medida em que o mesmo é invariante em relação à população de linhas axiais que compõem cada sistema.

O Coeficiente de Variação, dado pela divisão entre o desvio padrão e a média da Integração compara, de forma padronizada, a dispersão desta variável pelos seis mapas independentemente da dimensão de cada população de linhas axiais.

Assim, podemos observar que este coeficiente diminui de forma significativa do mapa de Tinoco para o Pombalino, que aumenta ligeiramente nos mapas Romântico e de Ressano Garcia para sofrer novo decréscimo no mapa do Estado Novo para voltar a aproximar-se, no mapa Actual, do valor já alcançado no mapa Romântico.

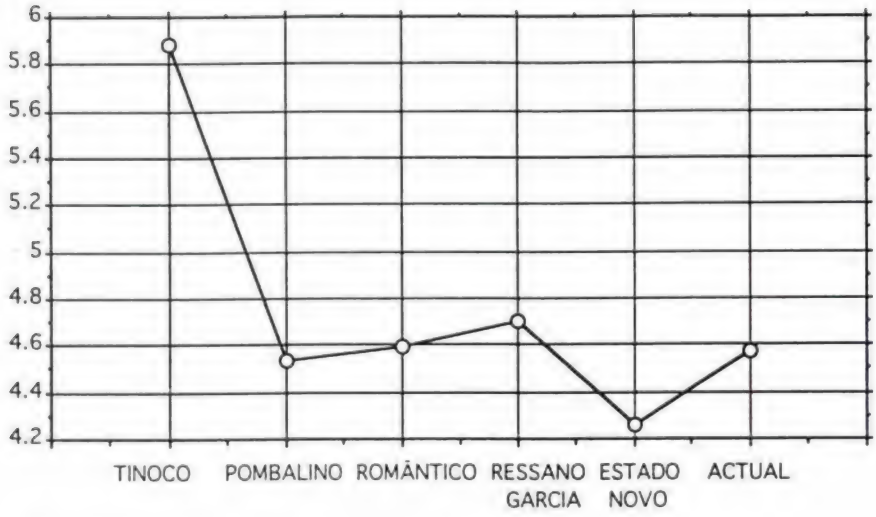


Fig. 16 Coeficiente de Variação da Integração para os mapas analisados.

Podemos confirmar, desta maneira, que a Integração das linhas axiais dos mapas de Tinoco e do Estado Novo caracterizam dois períodos morfológicos da cidade de Lisboa sendo o primeiro descrito como relativamente menos uniforme do que o segundo onde a variação da Integração é mínima quando comparada com a dos restantes mapas.

Se a integração média de 0,447 do mapa de Tinoco revela uma cidade algo segregada o mapa do Estado Novo apresenta um valor próximo daquele de 0,490 (ver Quadro I) mas com quase o triplo das linhas axiais que estão presentes no primeiro mapa. Isto significa que, em termos comparativos, acabamos por ter uma cidade quase tão segregada como a do período medieval, muito mais extensa e com menor variabilidade na integração das suas linhas axiais. Enquanto no período medieval se promoveu uma maior variação morfológica do seu tecido no mapa do Estado Novo este apresenta-se muito menos diferenciadado do que anteriormente.

Esta constatação mostra-nos que a extensão, melhoramento e consolidação do programa de obras públicas encetado durante a vigência do Estado Novo até 1948 contribuí para uma homogeneização morfológica do tecido urbano só comparável à que ocorreu durante a intervenção Pombalina, após o terramoto, mas com uma diferença fundamental: a intervenção do Estado Novo requalifica a cidade para limiares de variação morfológica que ficam aquém do Plano Pombalino constituindo-se, assim, num dos momentos de crescimento menos diververgentes, sob o ponto de vista morfológico, de toda a história da cidade de Lisboa desde o período medieval.

7. ANÁLISE DOS MAPAS AXIAIS E DOS SEUS CASCOS DE INTEGRAÇÃO

Os mapas axiais de Lisboa, desde o período medieval até ao actual, são reveladores das tranformações morfológicas que o tecido urbano da capital sofre ao longo de mais de três séculos da sua existência.

Certamente que o mapa que melhor caracteriza a estrutura urbana da cidade ao longo destes períodos, é o relativo à medida de Integração, pois relaciona cada linha axial com as restantes fornecendo indicações acerca dos espaços urbanos mais integrados e segregados, bem como do respectivo casco urbano, isto é, do conjunto de linhas axiais que se apresentam

com valores de integração indênticos ou superiores aos percentis mais elevados (5%, 10% e 20%).

O modo como o casco urbano se posiciona em relação à cidade e a forma mais ou menos fragmentada ou coesa de como se desenvolve territorialmente são profundamente reveladoras da evolução da morfologia da cidade que desde o perídodo medieval, de uma cidade voltada para o rio se transforma numa cidade que se expande para norte, consolidando-se como sede de uma área metropolitana com um centro direcional formado pelas Avenidas Novas situadas no prolongamento e expansão das malhas urbanas mais antigas que se desenvolvem à volta das Avenidas Almirante Reis e da Liberdade.

Se observarmos o Mapa de José Luis Tinoco bem como o correspondente mapa axial em relação à medida de integração (ver Figs. 1 *pág. 55* e 7) po-

Fig. 7 Mapa axial da planta de Tinoco relativo à medida de Integração

demos constatar que o conjunto de linhas axiais mais integradas, representadas neste último mapa a traço mais escuro, dispõem-se e concentram-se, de forma coesa, paralelamente ao rio fazendo uma única penetração para o interior pela Rua Nova dos Ferros. Isto mostra a importância morfológica atribuída às relações da cidade com o rio bem como ao comércio representado por aquela Rua Nova apesar de, como nos lembra Oliveira Marques (1994) a cidade já ter anteriomente ao Séc. XVII "quatro ou cinco centros ou pólos aglutinadores: a alcáçova, ainda centro militar e político, onde vivia o rei e se situava a corte; a catedral ou Sé, mantendo as suas funções religiosas ímpares, embora ameaçada pela proliferação de mosteiros e conventos mais periféricos; a Ribeira, o Rossio; e a Rua Nova na Baixa". Deste conjunto de pólos aglutinadores apenas a Ribeira e a Rua Nova pertencem ao casco urbano das linhas axiais mais integradas ficando os restantes em linhas mais segregadas, representadas no respectivo mapa axial pelas tonalidades mais claras confirmando que Lisboa dos meados Séc. XVII é uma cidade morfologicamente organizadaem função do Rio. O mapa evidencia ainda a importância do Paço Real situado no Terreiro do Paço que, conjuntamente com a Rua Nova, as Tercenas e os estaleiros de navios, contribuem para que o centro da cidade se defina na zona mais ribeirinha da Baixa, confirmado pelo casco urbano do mapa axial que se apresenta coeso e integrado. O Rossio, situado mais a norte, ocupa uma posição periférica em relação ao casco urbano ao contrário do Terreiro do Paço que se localiza na confluência das linhas de maior integração. A morfologia da organização do espaço urbano neste período consegue reproduzir as relações soci-

ais que se operam na sociedade, na medida em que o espaço urbano se revela como uma instância de produção e reprodução dessas mesmas relações. Com efeito, os espaços urbanos mais integrados correspondem a um maior incremento e intensificação das actividades urbanas que ocorrem ao longo deste período. A Lisboa oriunda da época medieval representada no mapa de Tinoco, caracteriza um período morfológico da evolução urbana de Lisboa, profundamente distinto dos que se lhe sucederam.

É com as consequências do terramoto de 1755 que se opera uma ruptura morfológica na organização espacial da cidade pela adopção do Plano Pombalino de profundas implicações até aos dias de hoje.

Não se trata somente de produzir um novo plano que rectifique e alargue os arruamentos estreitos e tortuosos que foram legados pelo período anterior, mas de propor um novo desenho para a cidade e, em particular, para o seu centro urbano.

Se as questões de ordem que o novo plano suscita podem ser encaradas como uma revitalização da Lisboa que sai dos escombros pelo respeito à localização das permanências, principalmente do Rossio e do Terreiro do Paço que se mantêm praticamente inalterados, o mesmo já não se passa com a estrutura urbana que emerge do novo Plano.

Ao analisarmos a Planta Pombalina bem como o correspondente mapa axial relativo à medida de integração (ver Figs. 2 *pág. 56* e 8) podemos constatar

Fig. 8 Mapa axial da planta Pombalina relativo à medida de Integração

que o casco urbano é distinto do anterior. Não só se expande para o interior, deixando adivinhar a importância que o Passeio Público passará a assumir, como promove a ligação entre a Lisboa Oriental – da zona segregada do Castelo – com a Ocidental – da zona do Bairro Alto. Trata-se de uma nova malha reticular que promove a integração das diferentes partes da cidade. Do Bairro Alto pela saída de Santos e pela Rua do Alecrim e da zona do Castelo pela Rua da Madalena, afastando-se do rio e quase que "voltando as costas" a este.

As relações intra-urbanas passam a apresentar um significado não assumido pela Lisboa oriunda do período Medieval. O Terreiro do Paço continua a existir como espaço simbólico e de representação do poder do estado mas a sua importância na estrutura urbana é menor, já não faz parte do casco mais integrado e situa-se periféricamente em relação a este apesar de ser intersectado por linhas axiais oriundas do Rossio que cobrem as Ruas do Ouro, Augusta e da Prata. É uma nova cidade que promove, pela sua morfologia espacial, as relações intra-urbanas e, de algum modo, se

fecha em relação ao rio apesar de o Terreiro de Paço localmente promover essa abertura. O domínio da frente de rio sobre a cidade opera-se localmente mas não participa do casco urbano mais integrado.

O Rossio deixa de ter uma posição periférica para passar a fazer parte do casco urbano da cidade constituindo-se como pólo alternativo ao Terreiro do Paço. A separação das escalas monumental e gregária, de representação do estado e de actividades quotidianas, são assumidas agora, de forma separada, pelas praças do Terreiro do Paço e pelo Rossio.

O Passeio Público, desenhado sobre terrenos de quintas, não é incorporado no casco urbano mais integrado mas situa-se adjacente a este sugerindo o prolongamento da Baixa Pombalina ao longo de um vale – o Valverde. Se bem que a escala gregária de encontro e lazer do empreendimento definisse o destino do novo Passeio, a sua organização como espaço alinhado de árvores com a "aparência de quinta no fundo da província ou larga alameda, assaz monacal" (França 1990) não favorecia a sua utilização pelos lisboetas. À sub-utilização deste espaço público não é estranha a sua posição periférica em relação ao casco urbano mais integrado do Plano Pombalino.

É na Lisboa Romântica (ver Figs. 3 *pág. 56* e 9) que podemos observar que o casco urbano já comparece constituído pelo Passeio Público dando "cate-

Fig. 9 Mapa axial da Planta Romântica relativo à medida de Integração

goria social e urbana ao sítio, justificando edificações e valorizando palácios pelos alinhamentos" (J. R. Ferreira, 1994) participando activamente na organização morfológica da cidade que se expande para norte. Com efeito, o próprio Passeio organiza-se morfológicamente num anel de alinhas axiais mais integradas que o envolvem contrabalançando a existência de outra estrutura axial anelada formada por linhas axiais pertencentes à Baixa Pombalina, Bairro Alto, saída de Santos e Rua do Alecrim.

Estas estruturas aneladas de linhas axiais integradas reproduzem aquilo que Hillier e Hanson (1984) designam de "roda deformada", isto é, do conjunto de linhas axiais que se organizam como radiais de uma configuração, aproximadamente, em forma de roda. Segundo estes autores a roda deformada é característica dos assentamentos urbanos mais expontâneos, ou seja, daqueles que estão sujeitos, predominantemente, a regras de organização local e não global – à escala de todo o assentamento – como é o caso da Baixa Pombalina.

Nos mapas da Lisboa Romântica (ver Figs. 3 e 9) podemos constatar a formação dessas estruturas em forma de roda deformada indicando as mesmas a direcção da futura expansão urbana, mais orgânica e local, para

norte, e ao longo do rio, para ocidente. É, com efeito, neste período que se implantam o jardim da Estrela, o miradouro de S. Pedro de Alcântara e do Príncipe Real, confirmando, os dois ultimos, um percurso urbano do Cais Sodré ao Rato. Igualmente surgem a urbanização do Aterro da Boavista ao longo da faixa ribeirinha que será a futura 24 de Julho.

Estas formas aneladas do casco sugerem um desenvolvimento urbano mais diversificado quando comparado com o período precedente. Enquanto a Baixa surge a partir dos planos dos engenheiros militares Pombalinos, desenhada pelo poder centralizador do estado – onde predominam as regras globais sobre as locais para a construção da nova cidade – as novas extensões do casco urbano ao longo do Passeio Público e do anel de linhas axiais integradas que passam pela Praça do Cais do Sodré indicam um tipo de crescimento sujeito a regras locais geradoras da expansão da cidade Romântica – mais permeáveis a investimentos pontuais e privados, promovendo uma maior diversidade de intervenções arquitectónicas.

Estas tendências acentuam-se de alguma maneira no Plano de Ressano Garcia (ver Figs. 4 *pág. 57* e 10) na medida em que a estrutura anelada de linhas

Fig. 10 Mapa axial da Planta Ressano Garcia relativo à medida de Integração

axiais mais integradas que passam pelo Cais do Sodré se mantém relativamente intacta. A grande diferença ocorre pela exclusão do que outrora foi o Passeio Público e a sua substituição pela Avenida da Liberdade configurando-se a linha axial que a cobre como pertencente ao casco urbano da cidade. O anel que envolvia aquele Passeio desaparece para dar lugar a uma longa linha axial que expande o casco urbano para norte. isto sugere tratar-se de um compromisso com os dois momentos anteriores : por uma lado, a preservação de uma roda deformada que se desenvolve ao longo do rio para ocidente e, por outro, o apontar de uma nova direccionalidade que não estava presente no desenho de Lisboa. O germe do futuro centro direcional, constituído por um casco urbano de linhas axiais bem integradas, já está presente no plano de Ressano Garcia para Lisboa. Esta confirmação contraria a ideia colocada por V.M. Ferreira (1994) de que a nova Avenida seria uma referência urbanística ao "boulevard Haussmaniano" e não um modelo de revovação urbana como propõem M.J. Rodrigues (1979) e J. M. Fernandes (1980). Trata-se, com efeito, da génese da nova cidade que se irá expandir a partir das Avenidas Novas embora ainda constituam áreas segregadas no Plano de Ressano Garcia. Se bem que o desenho da nova malha destas Avenidas retome o reticulado geométrico da Baixa Pombalina e, portanto, traduza um modelo

gerado por leis globais de desenho e ordenamento urbano as funções desempenhadas por ambas são, ainda, distintas. As primeiras como espaço de expansão urbana espacialmente segregado da escala monumental da cidade e a segunda como intervenção centralizadora e conformadora das relações espaciais da sociedade civil com o novo estado absolutista.

É na simbiose destes "momentos" de desenho urbano que se consolida a participação do Estado Novo (ver Figs. 5 *pág. 58* e 11) pelo retomar do Plano

Fig. 11 Mapa axial da planta do Estado Novo relativo à medida de Integração

das Avenidas Novas pelo Eng. Duarte Pacheco nos finais dos anos 20 com a implantação do complexo do IST. O fomento das Obras Públicas associado a uma política administrativa autoritária que permitiu ao Município de Lisboa apropriar-se, entre 1935 a 1949, de cerca de um terço da área total concelhia conduziu à formação de uma enorme bolsa de terrenos que serviu de base para o lançamento de novos Bairros e equipamentos bem como pela consolidação de situações expectantes.

É no Estado Novo que o casco urbano de Lisboa se "desloca" para norte englobando as linhas axiais que cobrem, por um lado, as Avenidas da Liberdade, António Augusto Aguiar, Fontes Pereira de Melo e República e, por outro, a Almirante Reis, a Avenida de Roma e a Gago Coutinho sendo ambas unidas por transversais que passam pela Avenida João XXI, Avenida Estados Unidos da América e Morais Soares.

Todo o casco urbano de Lisboa se reconstitui e expande para norte deixando a Baixa de apresentar a centralidade que anteriormente tivera bem como a área envolvente ao Cais do Sodré deixará de se configurar também como pertencente áquele casco. É uma nova centralidade que leva a cidade para norte, propondo duas grandes linhas de penetração que se conformam aos vales, perpendiculares ao rio não deixando, contudo, as linhas axiais que constituem este casco de formarem aneis.

Não se trata já de uma configuração do casco urbano em roda deformada, mas de uma organização em múltiplos aneis de linhas axiais integradas que proporcionam percursos e usos alternativos formando o centro direcional de uma nova metrópole no qual se implantarão serviços e comércio com uma

lógica social de ocupação do espaço que confirma o novo casco urbano da cidade a norte (veja-se Gaspar, 1976). Além disso, a escala métrica deste casco altera profundamente as relações anteriormente estabelecidas pelo aumento da dimensão das linhas axiais. Compare-se a dimensão linear das Ruas do Ouro, Augusta e da Prata com cerca de 550 metros de comprimento com as da Almirante Reis com 3 100 metros e a Avenida da República com 1 700 metros.

Outra escala impera neste novo casco muito mais voltado para a definição de uma direcionalidade norte do que para a concentração das actividades urbanas mais intensas numa área restrita. Trata-se de uma nova cidade assumida morfológicamente como centro direcional constituido por aneis múltiplos de linhas axiais integradas com uma escala métrica nunca antes desenhada onde predomina uma morfologia que "agarra e coze" as diferentes partes do tecido urbano mais periférico e segregado.

No período actual (ver Figs. 6 *pág. 59* e 12) podemos constatar o reforço das tendências anteriormente detectadas no Plano do Estado Novo através

Fig. 12 Mapa axial do momento actual relativo à medida de Integração

da clarificação do casco urbano formado pelas linhas axiais que cobrem as Avenidas Almirante Reis e Gago Coutinho, por um lado, e a da Liberdade, Fontes Pereira de Melo e da República, por outro. As linhas axiais transversais a estas últimas deixam de configurar anéis múltiplos simplificando a conformação do casco urbano que se apresenta agora com uma clara direccionalidade norte. Este sentido é, em parte consequência do preenchimento, por novos empreendimentos, dos "hiatos" urbanos deixados no Mapa do Estado Novo: Olivais Norte e Sul, Chelas e Telheiras propiciam um novo casco urbano definido de uma forma ramificada para norte configurando-se a Av. João XXI como a única via urbana coberta por linhas axiais integradas que se dispõem transversalmente ao desenvolvimento norte do casco urbano. A Baixa Pombalina deixa de ser definitivamente o centro morfológico de Lisboa para passar a ser mais um dos seus bairros.

Em resumo, desde o Plano de Tinoco, em que a cidade se voltava intencionalmente para o rio, assistimos a uma progressiva orientação do casco

urbano para norte configurando-se este, nos dias actuais, como centro direcional plenamente assumido.

Qualquer novo plano que requalifique as relações da cidade com rio terá de levar em consideração a nova morfologia da cidade que se foi estruturando após o terramoto de 1755 e entender que somente poderá aspirar a uma nova conformação se propuser alterações locais que não interfiram globalmente na morfologia urbana já consolidada da cidade de Lisboa.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como resultado das análises elaboradas podemos detectar a ocorrência de dois períodos morfológicos na cidade de Lisboa: antes e após o terramoto. Podemos mesmo dizer que estamos em presença de duas cidades que se caracterizam de modo diversificado em relação à dimensão global das suas linhas axiais bem como à configuração e posição do casco urbano em relação a todo o seu tecido urbano.

A mais antiga, mais segregada mas menos homogénea em termos de Integração das suas linhas axiais, e a mais moderna, menos segregada após o terramoto mas progressivamente menos integrada, culmina numa menor variabilidade do seu tecido urbano ao qualificar o seu território de forma relativamente indiferenciada, principalmente no período do Estado Novo.

Conclui-se pelo momento notável da alteração da morfologia da cidade dada pela intervenção Pombalina, coincidente com a modificação operada na sociedade portuguesa, só possivel devido à existência de uma catástrofe natural aliada a um forte domínio do poder centralizador do Estado. Esta alteração é contudo acompanhada de uma diminuição significativa da inteligibilidade espacial do tecido urbano pelas intervenções urbanas que sucessivamente ocorreram desde a catástrofe de 1755, principalmente pelas modificações introduzidas no período do Estado Novo que promovem uma acentuada homogeneização morfológica do seu tecido urbano bem como a consolidação de um centro direcional que se afasta progressivamento do rio.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Fernandes, J. M. (1980) "Alguns apontamentos sobre urbanismo alfacinha. Da Baixa ao Campo Grande, do Séc. XVIII ao Séc. XX". *Arquitectura*, ano 11, 4.ª Série, 138.

Ferreira, J.R. (1994) "Passeio Público". Verbete do *Dicionário da História de Lisboa*, Direcção de F. Santana e E. Sucena. Carlos Quintas & Associados – Consultores Ltda..Lisboa.

França, J. A. (1976) *"Lisboa Oitocentista"*. Academia Nacional de Belas Artes/ Fundação Calouste Gulbenkian. Exposição Documental. Lisboa.

França, J. A. (1987) *"Lisboa Pombalina e o Iluminismo"*. Bertrand Editora. Lisboa.

França, J. A.(1990) " *A Arte em Portugal no Século XIX"*, Lisboa, vol.II, 2.ª Ed., BertrandEditora

Gaspar, J. (1976) *"A Dinâmica do Centro Funcional de Lisboa"*. Livros Horizonte. Lisboa.

Hillier, B. e Hanson, J. (1984) *"The Social Logic of Space"*. Cambridge University Press. Cambridge.U.K..

Krüger, M.J.T. (1990) *"On Node and Axial Grid Maps: Distance Measures and Related Topics"*.Working Paper. The Bartlett School of Architecture. University College Lodon.

Marques, A.H.O. (1984) "Lisboa Evolução; Séculos XII a XV". Verbete do *Dicionário da História de Lisboa*. Direcção de F. Santana e E. Sucena. Carlos Quintas & Associados – Consultores Ltda..Lisboa.

Moita, I. (1982) *"Lisboa e o Marquês de Pombal"*, vol.II, Lisboa, Museu da Cidade, CML

Moita, I. (1983) *"Lisboa Quinhentista – A Imagem e a Vida da Cidade"*. Direcção dos Serviços Culturais da Câmara Municipal de Lisboa. Museu da Cidade. Lisboa.

Nunes da Silva, C. (1987) *"Planeamento Municipal e Organização do Espaço em Lisboa: 1926-1674"*, Tese de Mestrado CEG-UL, Lisboa

Rodrigues, M.J. (1979) *"Tradição, transição e mudança. A produção do espaço urbano na Lisboa oitocentista"*. Boletim da Assembleia Distrital. Lisboa.

Santana, F. (1994) "Lisboa Evolução: Período da Expansão". Verbete do *Dicionário da História de Lisboa*, Direcção de F. Santana e E. Sucena. Carlos Quintas & Associados – Consultores Ltda..Lisboa.

ÍNDICES ANTERIORES

N.º 1 / 94 - Junho 1994

ARTIGO CONVIDADO

Aceleradores de Partículas por Interacção Laser - Plasma: J.T. Mendonça e L. Oliveira e Silva

COMUNICAÇÕES CIENTÍFICAS

Termodinâmica para Engenharia Mecânica: Finalidades e Objectivos: João Ventura

Chemistry, Geology and Materials Science of Geothermal Systems: M.O.S.P. Caldeira and C.A.C. Sequeira

Nil Contribution of the Cosmological Constant to the Plaine Gravitational Waves in General Relativity: K.S. Adhav and T.M. Karade

A Cilindrically Symmetric Cosmological Model in Bimetric Relativity: Shailendra Deo

A Reflectmetric System for the Tokamak Isttok: P. Varela, A. Silva, S. Verganota, F. Serra, M.E. Manso, J.A. Cabral and C.A.F. Varandas

The Difficulty of Attributing a Physical Significance to Quantities Work and Heat in the First Principle of Thermodynamics. The Resolution of an Entropy Maximization Controversy: Rodrigo de Abreu

Detecção de Solutos em Cromatografia Iónica - Detector Condutimétrico: J. Costa Pessoa

Natureza e Estrutura da Revista Técnica

N.º 2 / 94 - Setembro 1994

INTERVENÇÕES NA CERIMÓNIA COMEMORATIVA A DUARTE PACHECO:

Professor Diamantino Freitas Gomes Durão
Presidente do IST

Professor Jorge Borges de Macedo
Director do Arquivo Nacional/Torre do Tombo

Professor E.R. de Arantes e Oliveira
Director do LNEC

Professor A. Simões Lopes

Reitor da Universidade Técnica

Engenheiro António Silva Teixeira

Presidente da Direcção da AAAIST

Engenheiro Ferreira do Amaral

Ministro das Obras Públicas, Transportes e Comunicações

TESTEMUNHOS SOBRE VIDA E OBRA DE DUARTE PACHECO:

Duarte Pacheco um Homem do futuro: Luís Guimarães Lobato

Posicionar o Instituto Superior Técnico para o início do Século XXI: P. Conceição, D.F.G. Durão e M.V. Heitor

Duarte Pacheco - Acção, Engenharia, Elevação: M. de Abreu Faro

Concepção Arquitectónica de Instituto Superior Técnico: Madalena Cunha Matos (Arquitecta - Departamento de Engenharia Civil do IST, Universidade Técnica de Lisboa)

N.º 3 / 94 - Dezembro 1994

ARTIGO CONVIDADO

A Fusão Nuclear Controlada, o Programa Comunitário da Fusão e a Participação Portuguesa: J.A.C. Cabral, M.E. Manso e C.A.F. Varandas

COMUNICAÇÕES CIENTÍFICAS

The Ideal Gas Equation P = αu and the Energy-Entropy Principle: Rodrigo de Abreu

Electrochemical Properties of Polymer Electrolytes: L.P.S. Araújo and C.A.C. Sequeira

Redes Neuronais em Robótica: Pedro Quintas Aguiar e Luís Borges de Almeida

The Concepts of "Gorce" and "Gheat": What is the Problem with the First Law of Thermodynamics?: Rodrigo de Abreu

Os Sistemas de Vácuo de Limpeza da Câmara e de Injecção de gás do Tokamak ISTTOK: C.A.F. Varandas, C. Freitas, V. Prego, A. Soares, B. de Groot, F.M. Dias, B.B. Carvalho, J. Sousa, H. Fernandes, S. Magalhães e J.A.C. Cabral

Térmica de Edifícios: uma Solução Integrada para Distintos Utilizadores: J.M.S. Dionísio

Detecção de Solutos em Cromatografia Iónica - Detector Espectrofotométrico: J. Costa Pessoa

N.º 1 / 95 - Março 1995

ARTIGO CONVIDADO

A Ciência dos Sistemas Complexos: Rui Dilão

CIÊNCIA E TECNOLOGIA: NOTAS BREVES

Heinrich Hertz: M. de Abreu Faro

Prémio da Boa Esperança 1993 atribuido a professor do IST

Plasmas Coloidais: David P. Resendes

Novos Materiais para aplicações em Engenharia: Rogério Colaço

COMUNICAÇÕES CIENTÍFICAS

Salinidade Atmosférica: um vector natural de risco: A.M.G. Pacheco, A.J. Sousa, R. Figueira, C. Branquinho, F. Catarino

Thin Film Solid state microbatteries: L.P.S. Araújo, M.J.C. Plancha and C.A.C. Sequeira

Detecção de Solutos em Cromatografia Iónica - Detecção Espectrofotométrica Indirecta: J. Costa Pessoa

A Mecânica Quântica de Heisenberg: João Paulo Neves Monteiro dos Santos

Equação de Duffing e Método de Liapunov-Schmidt: Diogo Luís Aguiar Gomes

N.º 2 / 95 - Junho 1995

ARTIGO CONVIDADO

Funções Delta no Universo da Análise Não-Standard: J. Sousa Pinto

NOTAS BREVES

Estudo geofísico e vigilância de vulcões activos - o vulcão do fogo: Sandra Heleno da Silva

Teoria de Perturbações e ressonância - o pêndulo simples: João Paulo Santos

A utilização de polímeros em fotónica: Luís Miguel Lapão

COMUNICAÇÕES CIENTÍFICAS

Salinidade Atmosférica: Primeiras etapas de um programa de biomonitorização: R. Figueira, C. Branquinho, A.M.G. Pacheco, A.J. Sousa, F. Catarino

A Produção Industrial de Anidrido Ftálico a partir de O-Xileno sobre Catalizadores de V_2O_5/TiO_2: C.R. Dias, M. Farinha Portela, J. Lemos Pinto

Sobre a estabilidade de populações iónicas não girotrópicas: A.L. Brinca

Simulação da operação de compressores por programas de cálculo automático: João F. P. Gomes

On the theory of the simple rotating disc electrode: P.S.D. Brito, R.M.M. Antunes, C.A.C. Sequeira

N.º 3 / 95 - Outubro 1995

ARTIGO CONVIDADO

Que Futuro para a Investigação em Engenharia Civil: E.R. Arantes e Oliveira

NOTAS BREVES

Desenvolvimento de um Inventário das Águas Subterrâneas de Portugal: Doutor J.P. Cárcomo Lobo Ferreira

RPM - Rede Inter-Universitária Portuguesa para a promoção e difusão das tecnologias Microelectrónicas: Prof. Epifâneo da Franca e Eng.ª Rosário Pinto

COMUNICAÇÕES CIENTÍFICAS

The Relevance of Non-imaging optics for solar energy: a review: Manuel Collares Pereira

Geometrical relations for non-inertial observers: M. Hermínia Marçal

Propagação de erros em problemas de minimos quadrados: Diogo Luís Aguiar Gomes

On the theory of the rotating ring-disc Electrode: P.S.D. Brito, R.M.M. Antunes and C.A.C. Sequeira

Incêndios em núcleos urbanos antigos. Verificação da segurança contra incêndios na Mouraria: José Manuel Felizardo Gonçalves

N.º 4 / 95 - Dezembro 1995

(Edição comemorativa dos 70 anos da Revista Técnica)

ARTIGO CONVIDADO

Ad Multos Annos: J. Fernando de Souza

COMUNICAÇÕES CIENTÍFICAS

Modernas concepções da Mecânica: A. Mira Fernandes

Estructura da Luz - Hipótese dos Quanta, Métodos de Estatística: António da Silveira

Um Vulcão perto de Lisboa entre o Morganhal e Laveiras: Prof. Ernest Fleury

Investigação Científica e Indústria: A. Herculano de Carvalho

Notas sobre a determinação do Manganês nos seus minérios: A. Herculano de Carvalho

Novo método de cálculo e acerto dos diagramas no projecto das turbinas mixtas (Francis): Manuel P. R. da Costa de Barros

Estudo sobre o electrodinamómetro de indução: C. Ferrer Moncada

Movimento permanente gradualmente variado, estudo geral do Regolfo: Alberto Abecasis Manzanares

A Fotoelasticidade no ensino e na técnica: Manuel Mendes da Rocha

TÉCNICA
Revista de Engenharia
Publicação trimestral
de investigação científica e desenvolvimento

UMA REVISTA DE ENGENHARIA

A Técnica, Revista de Engenharia, tal como a Associação dos Estudos do Institu. Superior Técnico, onde se integra, acompanha, desde os primeiros tempos, vida do Instituto.

Das suas páginas constam artigos científicos e técnicos de flagrante actualidad quantas vezes pioneiros, entre nós, de ciência nova e de novas tecnologias.

A revista tem uma periodicidade de quatro números por ano e está estruturada e perfeita adequação à intensa actividade de investigação e desenvolvimento que hoje s processa no campus de Instituto Superior Técnico.

Compreende, assim artigos convidados, comunicações científicas originais e notícic sucintas e rigorosas sobre ciência, tecnologia e desenvolvimento.

Trata-se, pois, de uma revista científica de nível o que não impede a colaboração d estudantes desde que devidamente credenciados por investigadores qualificados e d reconhecido mérito.

Torne-se assinante da Técnica.

Para mais informações contacte-nos pelo telefone 351-1-848 10 18 / 841 73 62 ou fax 351-1-847 40 14 / 849 92
ou escreva-nos para: Técnica, Revista de Engenharia, Av. Rovisco Pais n.° 1, P-1098–Lisboa CODEX
Publicidade: DOSSIER – Comunicação e Imagem, Lda., R. Eça de Queirós, 18 - 2.° 1000 Lisboa
Telefs. (01) 355 92 94/5 - 353 73 21 – Fax/Telef. (01) 353 73 12

Obras Gémeas.

Obra de Tiziano

Reprodução da Maiadouro

Iguais em Tudo, Menos na Moldura.

A qualidade de impressão da Gráfica Maiadouro impressiona mesmo os mais exigentes. Muito dificilmente Tiziano distinguiria a sua obra-prima da nossa obra gémea. A prova que a mais avançada tecnologia e a completa especialização dos nossos impressores só têm rival na peça original.
São mais de trinta anos a imprimir qualidade a tudo o que é Livros e Revistas, Catálogos, Desdobráveis, Brochuras ou Cartazes, sempre na linha da frente das Artes Gráficas em Portugal. Controlando todos os processos de produção, da fotocomposição e fotografia à montagem, reprodução e acabamento, com o rigor e o conhecimento dos grandes mestres.
É por isso que a assinatura Maiadouro é a melhor garantia de um trabalho perfeito.
Mesmo sem moldura.

GRÁFICA MAIADOURO, S.A.

IMPRIME-LHE QUALIDADE.

SEDE:
Rua Padre Luís Campos, 686 - VERMOIM
Apartado 1006 - 4471 MAIA Codex
Tel.: (02) 944 82 45/84 45 - 948 88 30/60 04
Fax: (02) 948 77 07

DELEGAÇÃO:
Avenida Elias Garcia, 162 - 2.º Esq.
1050 LISBOA
Tel.: (01) 795 53 00 - 796 92 10
Fax: (01) 796 92 79

Ciência e Tecnologia para antecipar o futuro.

Programa Praxis XXI*

Programa Stride*

Programa Interreg II*

Programa Base de Investigação Científica e Tecnológica (PBICT)

Programas Específicos:

Ciências da Saúde

Ambiente

Ciências Sociais e Humanas

Lusitânia

Ordenamento do Território e Desenvolvimento Urbano

Cooperação Universidade-Empresa

Formação e Mobilidade de Recursos Humanos

Fundo de Apoio à Comunidade Científica (FACC)

Cooperação Internacional em C&T

Acções de Apoio Geral ao Sistema Científico

*Co-financiado pela Comissão Europeia e pelo Estado Português

junta nacional de investigação científica e tecnológica

Av. D. Carlos I, 126
1200 LISBOA
Telefs.: 397 90 21 / 7
Telefax: 60 74 81
End. Teleg.: JUNIC-LISBOA
E-mail : jnict@geral.jnict.mailpac.pt

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E DA TECNOLOGIA